

THESES

présentées en vue d'obtenir le titre

de

DOCTEUR-INGENIEUR

par

Marco Aurelio SOLAR BAEZA
Ingénieur Université de Concepcion – CHILI
Assistant Ecole d'Ingénieur Université de Concepcion

PREMIERE THESE

**ETUDE DU TRANSPORT PNEUMATIQUE VERTICAL
A FORTÉ CONCENTRATION DU SOLIDE**

DEUXIEME THESE

**DETERMINATION DU COEFFICIENT DU TRANSFERT DE MATIERE
ET DE L'AIRE INTERFACIALE DANS LES REACTEURS
GAZ-LIQUIDE A BULLES – THEORIE ET EXPERIENCE**

SOUTENUES LE

1970, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

Membres du Jury :

Président : P. LE GOFF
Examineurs : J. BASTICK
C. PROST



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551919_0010

THESES

présentées en vue d'obtenir le titre

de

DOCTEUR-INGENIEUR

par

Marco Aurelio SOLAR BAEZA

Ingénieur Université de Concepcion – CHILI

Assistant Ecole d'Ingénieur Université de Concepcion

PREMIERE THESE

**ETUDE DU TRANSPORT PNEUMATIQUE VERTICAL
A FORTE CONCENTRATION DU SOLIDE**

FIGURES

SOUTENUES LE

1970, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

Membres du Jury :

Président : P. LE GOFF
Examineurs : J. BASTICK
C. PROST



ANNEE SCOLAIRE 1970/71

DOYEN : M. AUBRY
 ASSESSEUR : M. GAY

Doyens honoraires : MM. CORNUBERT - ROUBAULT -

Professeurs honoraires : MM. RAYBAUD - LAFFITTE - LERAY - JOLY - LAPORTE - EICHBORN -
 CAPELLE - GODEMENT - DUBREIL - L. SCHWARTZ - DIEUDONNE - LETORT - DODE - GAUTHIER -
 GOUDET - OLMER - CORNUBERT - CHAPELLE - GUERIN - WAHL -

Maîtres de Conférences honoraires : M. LIENHART - PIERRET -

PROFESSEURS

MM.

ROUBAULT	Géologie	HADNI	Physique
VEILLET	Biologie Animale	*BASTICK	Chimie
BARRIOL	Chimie Théorique	DUCHAUFOR	Pédologie
BIZETTE	Physique	GARNIER	Agronomie
GUILLIEN	Electronique	NEEL	Chimie Organique Industrielle
LEGRAS	Mécanique Rationnelle	BERNARD	Géologie Appliquée
BOLFA	Minéralogie	*CHAMPIER	Physique
NICLAUSE	Chimie	*GAY	Chimie Biologique
FAIVRE	Physique Appliquée	STEPHAN	Zoologie
AUBRY	Chimie Minérale	*CONDE	Zoologie
COPPENS	Radiogéologie	*WERNER	Botanique
DUVAL	Chimie	EYMARD	Calcul Différentiel et Intégral
FRUHLING	Physique	FELDEN	Physique
HILLY	Géologie	*GOSSE	Mécanique Physique
LE GOFF	Génie Chimique	*DAVOINE	Physique (ENSMIM)
SUHNER	Physique Expérimentale	HORN	Physique (1° cycle)
CHAPON	Chimie Biologique	*ROCCI	Géologie
HEROLD	Chimie Minérale Ind.	*Me LUMER	Mathématiques
SCHWARTZ B.	Exploitation Minière	DELPUECH	Chimie Physique
*MALAPRADE	Chimie	Mlle HUET	Analyse Supérieure
MANGENOT	Botanique	BLAZY	Minéralogie Appliquée
GAYET	Physiologie	CAUBERE	Chimie Organique
		VUILLAUME	Psychophysiologie
		ALAIS	Chimie Biologique

N... Mécanique Appliquée

N... Méthodes Mathématiques de la Physique

N... Mécanique Rationnelle

(*) Professeur titulaire à titre personnel

PROFESSEURS SANS CHAIRE

Mme BASTICK	Chimie P.C. EPINAL	JANOT	Physique P.C. EPINAL
MM. GUDEFIN	Physique	CACHAN	Entomologie Appliquée (ENSA)
FRENTZ	Biologie Animale	JACQUIN	Pédologie et Chimie agri.
MARI	Chimie (ISIN)	MAINARD	Physique M.P.
DEVIOT	Physique du Solide	MARTIN	Chimie P.C.
FLECHON	Physique P.C.	PAULMIER	Mécanique Expérimentale
VIGNES	Métallurgie	PROTAS	Minéralogie
JURAIN	Géologie C.B.G.	RIVAIL	Chimie Appliquée (CUCES)
BALESDENT	Thermodynamique, Chimie Appliquée (ENSIC)	DEPAIX	Probabilités et Statistiques

MAITRES DE CONFERENCES

MM. VILLERMAUX	Génie Chimique	CASTRO	Chimie Organique
METCHE	Biochimie Appliquée (Brasserie)	DEXHEIMER	Botanique
BAUMANN	Physique 1 ^o cycle	NOVERRAZ	Mathématiques
DURAND	Physique	TOURET	Géologie
GRANGE	Physique (ISIN)	MALENCE	Chimie (ENSIC)
BAVEREZ	Chimie (ENSIC)	GROSS	Chimie Organique
CHAMBON	Exploitation Minière (MINES)	LOCHON	Chimie Organique
HUSSON	Physique (ENSEM)	N...	Maths Appliquées
WEISSLINGER	Physique	N...	Mathématiques
GERL	Physique (MINES)	N...	Mathématiques
ROQUES	Chimie Minérale	N...	Physiologie Animale
FERRIER	Mathématiques	N...	Laiterie (Ecole Laiterie)
GILORMINI	Mécanique flui. (ISIN)	N...	Maths Appliquées
HILY	Mathématiques P.C.	N...	Pétrographie
		N...	Mathématiques
		N...	Physique (Aérotherm.)
		N...	ISIN

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

MM. AMARIGLIO - COEURE - DAVRAINVILLE - GIRARDEAU - OVAERT - RUYER - WEBER - PUJOL - SCHREIBER - GEORGES - MARTIN - WEISBROD -

A MA FEMME

A MA FAMILLE

A L'UNIVERSITE DE CONCEPCION (CHILI)

AVANT-PROPOS

Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur le Professeur P. LE GOFF dans son laboratoire de Génie Chimique du Centre de Cinétique Physique et Chimique. Nous tenons à lui exprimer ici toute notre reconnaissance pour les nombreux conseils et les moyens qu'il a mis à notre disposition.

Nous remercions Monsieur le Professeur J. BASTICK d'avoir bien voulu faciliter notre venue en France pour y réaliser ce travail et de l'honneur qu'il nous fait en acceptant de faire partie de notre jury d'examen.

Nous tenons aussi à remercier Monsieur C. PROST, Maître de Conférences à l'I.U.T. qui a également accepté de participer à notre jury de thèse.

Nos remerciements s'adressent aussi à Monsieur G. GAU, notre Chef de Groupe, qui a toujours su nous conseiller pour mener à bien ce travail.

En la personne de Monsieur le Professeur G. PIZARRO, Decano de la Escuela de Ingeniería de Concepcion (CHILE), nous exprimons notre gratitude à cette Ecole, pour l'aide matérielle qu'elle nous a accordée.

Nous ne saurions trop remercier tout le personnel technique et administratif du Centre de Cinétique Physique et Chimique.

Nous garderons un excellent souvenir de tous.

PLAN GENERAL

INTRODUCTION

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

ETUDE THEORIQUE

ETUDE EXPERIMENTALE

ANALYSE DES RESULTATS

- a) Zone stabilisée
- b) Zone d'accélération
- c) Influence des caractéristiques de l'alimentateur et des fluctuations du débit d'air

CONCLUSION

NOMENCLATURE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

FIGURES

INTRODUCTION

Depuis son apparition en 1942 le réacteur à lit fluidisé a suscité beaucoup d'intérêt car il semblait être le réacteur approprié pour effectuer les réactions très exothermiques nécessitant un contrôle précis de la température.

Il s'est avéré que cette technique présentait quelques inconvénients : la formation de bulles observée dans les lits fluidisés gaz-solide est un effet défavorable à l'obtention de rendements élevés.

Un autre type de réacteur souvent mentionné mais très peu étudié jusqu'ici est le réacteur à transport pneumatique. Ce réacteur présenterait tous les avantages du réacteur à lit fluidisé tout en ayant une distribution des temps de séjour plus favorable. Il est même probable que ce réacteur permettrait un contrôle encore plus précis de la température que celui qu'il est possible d'obtenir en lit fluidisé.

L'étude hydrodynamique du réacteur à transport pneumatique se ramène en somme à l'étude du transport pneumatique vertical ; ce problème a déjà fait l'objet d'un certain nombre d'études. Ces études étaient en général orientées vers le transport à grande vitesse et faible concentration de solide.

Puisque notre intérêt pour le transport pneumatique était principalement déterminé par ses applications aux réacteurs il était indispensable d'effectuer l'étude hydrodynamique à faible vitesse et à grande concentration de solide.

Une partie de ce travail est consacrée à l'étude de la zone à régime établi dans laquelle la vitesse de glissement solide-gaz et la perte de charge ont été mesurées.

Une autre partie comprend l'étude de la zone d'accélération des particules et l'étude de l'effet des dimensions de l'alimentateur du gaz et des fluctuations du débit gazeux pour le transport pneumatique.

Enfin à partir des résultats obtenus nous cherchons à expliquer les lois du frottement et de la vitesse de glissement du transport pneumatique vertical.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

PLAN

<u>1.1 - COEFFICIENT DE TRAINEE</u>		p. 1-1
<u>1.2 - VITESSE DE GLISSEMENT</u>		p. 1-3
<u>1.3 - PERTES DE CHARGE</u>		p. 1-5
<u>1.4 - EFFETS ELECTROSTATIQUES</u>		p. 1-9
<u>CONCLUSION</u>		p. 1-10

Peu d'études ont été effectuées sur le transport pneumatique vertical en phase dense et nous n'avons pu relever que deux travaux traitant principalement de ce sujet. C'est la raison pour laquelle nous mentionnerons également les travaux effectués sur le transport pneumatique vertical en phase diluée qui constitue un cas limite intéressant et relativement mieux connu.

ZENZ (31) a été le premier à s'intéresser à l'hydrodynamique du transport en phase dense et à déterminer la vitesse à laquelle apparaît la saturation ou engorgement ("choking velocity"). Il a étudié la perte de charge globale mais il n'a pas déterminé la vitesse de glissement gaz-solide ; la relation qu'il obtient est donc, comme nous le verrons par la suite, insuffisante pour décrire le système.

La même remarque peut également s'appliquer à l'étude effectuée conjointement par STEMERDING (26) et VAN ZONEN (28). STEMERDING ne différencie pas la zone d'accélération et la zone de régime établie et ne mesure pas non plus la concentration en solide ; il opère d'autre part avec un solide à granulométrie trop dispersée (catalyseur de cracking catalytique de diamètre variant de $20\ \mu$ à $150\ \mu$). Son étude hydrodynamique n'était donc en somme qu'une étude préliminaire à l'étude de la distribution des temps de séjour entreprise par VAN ZONEN.

Les résultats obtenus en transport pneumatique en phase diluée sont heureusement plus nombreux ; ces résultats concernent les grandeurs suivantes :

- coefficient de traînée
- vitesse de glissement
- perte de charge par frottement du solide
- perte de charge due aux effets électrostatiques

et nous les examinerons dans cet ordre.

Il est à noter que des trois premières grandeurs que nous venons de citer, deux seulement sont indépendantes comme nous le verrons dans l'exposé théorique ; chaque auteur a effectué le choix qui lui paraissait le meilleur et ce n'est donc pas toujours les deux mêmes grandeurs qui sont présentées dans les différents travaux. De trop nombreux travaux ne donnent de résultats que sur une seule grandeur, en général la perte de charge globale, ce qui n'est satisfaisant qu'aux très grandes vitesses (vitesse de glissement faible par rapport à la vitesse du gaz).

1-1 - COEFFICIENT DE TRAINEE

Quand nous laissons tomber une particule solide sphérique dans un gaz immobile et infini, il y a deux forces opposées qui agissent sur la particule, d'une part la force de pesanteur et d'autre part, la force de frottement due à la nature visqueuse du gaz. La première de ces forces est constante, égale au

poids de la particule solide et dirigée vers le bas, la deuxième est une fonction croissante de la vitesse de la particule et dirigée vers le haut. Il arrivera donc un instant où la force de frottement visqueuse sera égale au poids de la particule ; la vitesse à laquelle ces deux forces sont égales s'appelle vitesse de chute libre de la particule. Pour cette force de frottement, on définit un facteur de frottement qui dans ce cas s'appelle "coefficient de traînée". Ce coefficient est défini par :

$$C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \left(\frac{1}{2} \rho_g u_p^2 \right) = \pi \frac{d_p^3}{6} \rho_s g \quad (1.1)$$

Force de frottement Poids de la
ou force de traînée particule

d'où

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{g d_p}{u_p} \times \frac{\rho_s}{\rho_g} \quad (1.2)$$

Le coefficient de traînée ainsi calculé a été porté en fonction du nombre de Reynolds de la particule (23) qui est défini par la relation :

$$Re_p = \frac{d_p \rho_g u_p}{\eta_g} \quad (1.3)$$

On obtient ainsi, la courbe standard du coefficient de traînée, valable pour une sphère unique qui tombe à une vitesse constante dans un fluide immobile et infini (Fig. 1).

Si le gaz est immobile ou s'il y a un écoulement laminaire de ce gaz dans un tube on peut observer les faits suivants (23) : pour des nombres de Reynolds (Re_p) faibles, la couche limite entoure complètement la particule, mais pour une valeur de $Re_p \approx 10$ la couche limite se détache à l'arrière de la particule ce qui donne naissance à un remous qui reste attaché à la particule. A mesure que le nombre de Reynolds croît le remous croît en dimension et en intensité et à $Re_p \approx 500$ le remous se détache de la particule et forme une onde derrière elle ; tout d'abord cette onde est fluctuante mais à mesure que le nombre de Reynolds croît elle se stabilise. Pour des nombres de Reynolds $Re_p \approx 10^5$ l'épaisseur de la couche limite devient très faible ce qui se traduit par une forte chute du coefficient de traînée. Le nombre de Reynolds correspondant est appelé nombre de Reynolds critique.

Si la particule se trouve dans un courant gazeux turbulent, le mécanisme précédent est modifié et par conséquent la forme de la courbe donnant C_D est modifiée.

TOROBIN et GAUVIN (27) ont trouvé expérimentalement que le nombre de Reynolds critique correspondant à la chute du coefficient de traînée est fonction de l'intensité relative de la turbulence du gaz, et ils donnent l'expression suivante :

$$(Re_p)_{\text{critique}} = 45/I_r^2 \quad (1.4)$$

où I_r est l'intensité relative de turbulence.

Ils constatent d'autre part que les valeurs de coefficients de traînée sont indépendantes du fait que la particule n'est pas en régime établi, résultat qui est en désaccord avec les travaux de LUNON (16) et de LAPPLE et SHEPHERD (15) qui eux ont constaté que l'accélération de la particule a un effet sur le coefficient de traînée.

Par contre tous ces auteurs sont d'accord sur le fait que, à faibles intensités relatives de la turbulence gazeuse, on peut utiliser les coefficients de traînée déduits de la courbe standard.

En présence d'autres particules, le coefficient de traînée est modifié, puisque la couche limite de chaque particule est influencée par la présence des autres particules, et que l'onde qui se forme derrière elle est également modifiée. STEINOUR (25) considère que à partir d'une concentration de solide de 2 % en volume cette influence se manifeste.

Aux faibles concentrations REDDY et PEI (20) ont trouvé que le coefficient de traînée a une valeur plus grande que la valeur donnée par la courbe standard et que cette valeur diminue quand la concentration augmente.

FLEDDERMANN et HANSON (7) cités par TOROBIN et GAUVIN, ont trouvé que pour des nombres de Reynolds Re_p égaux à 40 une forte chute du coefficient de traînée peut se produire, et cette chute pourrait s'expliquer par la modification de la couche limite due aux autres particules.

JA MIN CHEN (12) a interprété l'ensemble des résultats obtenus par HARIU et MOLSTAD (9), CHAMBERS (4) et HELANDER (10) en transport pneumatique vertical et montré que les points obtenus se placent en général au-dessus de la courbe standard (Fig. 1). Cependant cette courbe décroît rapidement à partir d'une certaine valeur $Re_p \approx 1000$ qui pourrait donc correspondre à un nombre de Reynolds critique.

MEHTA (17) trouve que ce nombre de Reynolds critique est de l'ordre de 40 ce qui est en accord avec les résultats de FLEDDERMANN et HANSON.

En conclusion nous pouvons dire que le coefficient de traînée d'une suspension n'est plus le même que pour une particule unique. Certains auteurs (4,9,10,12,20) trouvent que la valeur du coefficient de traînée se place au-dessus de la courbe standard, et d'autres (7,17) trouvent une forte chute du coefficient de traînée pour $Re_p \approx 40$ ou $Re_p = 1000$ et cette chute pourrait être expliquée par la modification de la couche limite à partir d'un certain nombre de Reynolds, lorsqu'on se trouve en présence d'autres particules.

1-2 - VITESSE DE GLISSEMENT

On définit comme vitesse de glissement entre une particule et un courant gazeux la vitesse relative :

$$\Delta u = u_g - u_s \quad (1.5)$$

où
 Δu vitesse de glissement
 u_g vitesse du courant gazeux
 u_s vitesse de la particule

Pour une particule unique dans un courant gazeux dont l'intensité relative de turbulence est faible la vitesse de glissement est égale à la vitesse de chute libre de la particule et peut donc être calculée à partir de la relation (1.2) et de la courbe standard qui donne le coefficient de traînée.

Notons cependant que ceci n'est plus valable dans le cas d'une suspension, puisque les valeurs du coefficient de traînée ne correspondent plus à la valeur donnée par la courbe standard, et que la force de traînée doit tenir compte en plus du poids de la particule, du frottement dû au solide.

Divers auteurs ont étudié la vitesse de glissement d'une suspension solide en fonction du régime, de la vitesse du courant gazeux et de la nature et concentration du solide.

HELLINCKX et ROMPAY (11) ont effectué des études avec des particules dont le diamètre est compris entre 48μ et 245μ et à des concentrations plus faibles que 0,1 %. Ils ont établi l'expression suivante pour la vitesse des particules solides :

$$u_s = A_1 u_g - B_1 \quad (1.6)$$

où A_1 est une constante qui dépend de certaines caractéristiques (densité et probablement facteur de forme), mais pas de son diamètre, B_1 est la vitesse de chute d'une particule unique dont le diamètre est compris entre le diamètre moyen du lot et le diamètre de la particule la plus grosse. A_1 est en général inférieur à 1 ce que les auteurs interprètent en supposant que les particules sont freinées par des chocs particule-paroi. Leurs expériences démontrent que la vitesse des particules solides à faibles concentrations est indépendante de la concentration du solide. Cette dernière conclusion est en accord avec les résultats de HARIU et MOLSTAD (9).

De même, JONES et al. (13) concluent que la vitesse de glissement est seulement fonction de la nature du gaz et du solide et ils n'ont également opéré qu'à de faibles concentrations du solide. Leurs résultats sont en accord avec les résultats des autres auteurs (4,22,26,29) qui ont travaillé aussi à des faibles concentrations.

REDDY et PEI (20) établissent une expression du type :

$$u_s = u_g - A_2 - B_2 (1-\epsilon)^{2/3} \quad (1.7)$$

Ils opéraient à de faible concentration mais supérieure à celles utilisées par HELLINCK.

1-3 - PERTES DE CHARGE

Comme nous verrons dans le chapitre 4, la perte de charge totale dans un tube de transport pneumatique vertical, en régime établi, est la somme des termes suivants : le poids du gaz et du solide, et le frottement dû au gaz et dû au solide.

Nous pouvons donc écrire :

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right) = \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{p.g} + \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{p.s} + \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.g} + \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} \quad (1.8)$$

En négligeant le poids du gaz nous obtenons pour le frottement dû au solide :

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right) - \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.g} - \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{p.s} \quad (1.9)$$

Les auteurs qui ont étudié la perte de charge due au solide ont essayé d'établir des relations en fonction d'un facteur de frottement, et la définition du facteur de frottement varie suivant les auteurs.

HARIU et MOLSTAD (9) ont opéré sur des tubes de transport de 6,8 mm et 13,5 mm et avec des particules de 100 μ à 400 μ . Ils définissent un facteur de frottement par la relation :

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = \frac{2f_l}{D} \rho_s (1-\epsilon) u_s^2 \quad (1.10)$$

Mais leurs données incluent la zone d'accélération du tube de transport, et les facteurs de frottement ainsi calculés tiennent compte de l'accélération des particules ; les facteurs varient entre $6 \cdot 10^{-3}$ et $2 \cdot 10^{-3}$. Ces deux auteurs ont effectué un calcul approximatif de la perte de charge due à l'accélération des particules et ils obtiennent ainsi un facteur de frottement approché voisin à $1 \cdot 10^{-3}$.

STEMERDING (26) a travaillé avec des particules de catalyseur de cracking dont le diamètre est compris entre 20 μ et 150 μ dans un tube de transport de 51 mm de diamètre. Il obtient, pour des vitesses de gaz supérieures à 7 m/sec un facteur de frottement constant et égal à $3 \cdot 10^{-3}$; à plus faible vitesse le facteur de frottement semble dépendre de la vitesse du gaz.

VOGT et WHITE (29) expriment leurs résultats en fonction de α , rapport entre la perte de charge totale par frottement et la perte de charge par frottement due au gaz seul, c'est à dire :

$$\alpha = \frac{\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} + \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.g}}{\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.g}} \quad (1.11)$$

De leurs résultats expérimentaux, ils tirent pour α l'expression suivante :

$$\alpha - 1 = A \left(\frac{D}{d_p} \right)^2 \left(\frac{\rho_g}{\rho_s} \cdot \frac{G_s/G_g}{Re_g} \right)^{k_0} \quad (1.12)$$

Avec Re_g défini par :

$$Re_g = \frac{D u_g \rho_g}{\eta_g} \quad (1.13)$$

où A et k_0 sont deux fonctions du groupe adimensionnel

$$\sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_g) \rho_g g d_p^3}{3 \eta_g^2}}$$

les valeurs de A et k_0 en fonction de ce groupe adimensionnel sont représentées par les auteurs sous la forme d'un graphique.

JONES et al. (14) définissent un facteur de frottement pour le solide en fonction de l'énergie cinétique du gaz :

$$\left(- \frac{\Delta P}{\Delta z} \right)_{f.s} = \frac{f_2 \rho_g u_g^2}{2D} \quad (1.14)$$

Ils expriment f_2 en fonction du rapport entre le débit de solide et le débit du gaz.

$$f_2 = 5,75 \cdot 10^{-5} \frac{A_0}{\phi^{0.5}} \left(\frac{G_s}{G_g} \right)^r \quad (1.15)$$

avec $r = 1$ pour $A_0 \leq 207 \text{ (cm}^2/\text{cm}^3\text{)}$

$$r = \left(\frac{207}{A_0} \right)^{1/3} \text{ pour } A_0 > 207 \text{ (cm}^2/\text{cm}^3\text{)}$$

où A_0 est la surface par unité de volume de la particule et ϕ est le facteur de forme de la particule.

BELDEN et KASSEL (1) définissent un coefficient global de frottement, par la relation :

$$\left(- \frac{\Delta P}{\Delta z} \right)_f = \left(- \frac{\Delta P}{\Delta z} \right)_{f.g} + \left(- \frac{\Delta P}{\Delta z} \right)_{f.s} = \frac{2f_3 (G_g + G_s) u_g}{D \Omega} \quad (1.16)$$

et à l'aide de leurs données expérimentales ils obtiennent la relation suivante :

$$f_3 \times (Re_g)^{0.2} = 0.049 + 0.22 \frac{G_s \cdot G_g}{(G_g + G_s)^2} \quad (1.17)$$

Ils trouvent que le facteur de frottement est indépendant du diamètre des particules, fait qui semble être en désaccord avec les résultats obtenus par HARIU et MOLSTAD (9).

REDDY et PEI (20) ont trouvé que la perte de charge totale due à la présence de solide dans des tubes verticaux est proportionnelle au débit de solide, mais dans cette perte de charge ils ont inclus le poids du solide, et ils observent ainsi comme BELDEN et KASSEL (1) que la perte de charge est indépendante du diamètre des particules solides.

BOOTHROYD (3) a utilisé des particules de 20 μ de diamètre et des tubes de transport de 25 mm, 50 mm et 75 mm. Il trouve que le rapport de pertes de charge α , défini par la relation (1.11) peut être inférieur à l'unité pour des petites particules mais pour les plus grosses particules ce rapport est toujours supérieur à l'unité. Il donne l'expression suivante :

$$\alpha = \frac{G_s + G_g}{G_g} \psi_3 (Re_g) \psi_4 \left[\frac{\rho_g}{\rho_s}, \left(\frac{D}{d_p} \right)^2, Re_g \right] \quad (1.18)$$

où ψ_3 et ψ_4 sont deux fonctions déterminées expérimentalement.

En transport horizontal RICHARDSON et Mc LEMAN (21) trouvent que la perte de charge due au solide est proportionnelle au débit de solide, et ils l'expriment sous la forme :

$$\alpha = K \frac{G_s}{u_p \cdot u_s} \quad (1.19)$$

Nous mentionnons ici ce travail bien qu'il ait été effectué en transport horizontal car c'est une étude fréquemment citée à cause de la simplicité des correlations obtenues. Il est vrai qu'en transport horizontal le poids du solide ne joue pas sur la perte de charge totale et que par conséquent il est plus facile d'obtenir des résultats précis.

D'après les résultats de SEGLER (22) le facteur K de RICHARDSON et Mc LEMAN, est inversement proportionnel au diamètre du tube de transport.

FARBAR (6) présente également ses résultats à l'aide du facteur α , et en portant α en fonction de G_s/G_g il obtient une courbe unique.

D'autres définitions du facteur de frottement ont été également utilisées.

C'est ainsi que CHAMBERS (4) utilise un facteur de frottement défini par la relation :

$$\left[\left(- \frac{\Delta P}{\Delta z} \right)_{f.s} + \left(- \frac{\Delta P}{\Delta z} \right)_{f.g} \right] = \frac{f_4}{2D} \frac{(G_s + G_g)^2}{\Omega^2 [\rho_g \epsilon + \rho_s (1 - \epsilon)]} \quad (1.20)$$

et il obtient une correlation de ce facteur en fonction d'un nombre de Reynolds modifié.

$$Re_m = \frac{D [\rho_g \epsilon + \rho_s (1 - \epsilon)] u_g}{\eta_g} \quad (1.21)$$

GOPICHAND SARMA et RAO (8) définissent un facteur de frottement pour la perte de charge totale dans le tube :

$$\left(- \frac{\Delta P}{\Delta z} \right) = \frac{2f_5}{D} \rho_g u_g^2 \quad (1.22)$$

et ils expriment ce facteur de frottement par une fonction des groupes adimensionnels suivants :

$$f_5 = \psi_5 [(1-\epsilon), (G_s/G_g), (u_p/u_g), (D/d_p)] \quad (1.23)$$

HELANDER (10) utilise le facteur de frottement donné par la formule :

$$\left(-\frac{P}{z}\right)_{f.s} = \frac{f_6}{D} \rho_s (1-\epsilon)^2 u_s^2 \quad (1.24)$$

et d'après ses résultats obtient :

$$f_6 = 0.145 \left(\frac{d_p}{D}\right)^{1.152} \frac{\rho_s (1-\epsilon)^{-1.576}}{\rho_g} \quad (1.25)$$

MEHTA (17) définit le facteur de frottement par l'expression :

$$\left[\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.g} + \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s}\right] = \frac{f_7}{2D} (\rho_g u_g^2 + \rho_s u_s^2) \quad (1.26)$$

et l'exprime en fonction de Re_g .

Nous terminons cette revue bibliographique en mentionnant le travail de JA-MIN-CHEN (12) qui a été le premier auteur à donner une explication analytique de la perte de charge due au frottement du solide. Sa méthode de présentation a le grand avantage de conduire à des définitions précises et simples du facteur de frottement et de l'effet électrostatique et c'est donc cette méthode que nous avons adoptée dans ce rapport.

D'après son analyse, la perte de charge par frottement dû au solide en l'absence des effets électrostatiques est formée de deux termes, un terme qui tient compte des chocs entre les particules elles-mêmes et un autre terme qui tient compte des chocs entre les particules et la paroi.

Puisque les chocs entre les particules ne sont pas de chocs parfaits il y a une perte de quantité de mouvement à chaque collision, et JA-MIN-CHEN (12) considère que cette perte est proportionnelle à la quantité de mouvement que possèdent les particules avant la collision ; la perte de quantité de mouvement par choc est donc :

$$k_1 m_p u_s \quad (1.27)$$

où m_p est la masse de la particule, et k_1 le coefficient de perte de quantité de mouvement ; il considère k_1 comme constant, indépendant de la vitesse du solide ou des autres paramètres, caractérisant le système.

En raisonnant d'une façon analogue à la théorie cinétique des gaz, il établit que le nombre de chocs entre particules par unité de temps et par unité de volume est proportionnel au carré de la concentration du solide et proportionnel aussi à la fluctuation de la vitesse des particules ; si z_{ss} est la fréquence des chocs par unité de volume nous pouvons écrire :

$$z_{ss} = k_2 (1-\epsilon)^2 u_s' \quad (1.28)$$

D'après les résultats obtenus par SOO et al. (24), il considère que cette fluctuation de la vitesse axiale est proportionnelle à la vitesse axiale des particules solides ; il obtient donc pour le frottement dû aux chocs entre les particules l'expression :

$$\begin{array}{l} \text{Frottement dû aux} \\ \text{chocs entre} \\ \text{particules} \end{array} = K_{ss} (1-\epsilon)^2 u_s^2 \quad (1.29)$$

Pour le nombre de chocs entre les particules et la paroi, il obtient par un raisonnement similaire :

$$z_{s,p} = k_3 (1-\epsilon) u_r' \quad (1.30)$$

où u_r' est la fluctuation de la vitesse radiale des particules et il considère également que cette fluctuation est proportionnelle à la vitesse axiale du solide. Il obtient finalement pour le frottement dû aux chocs entre les particules et la paroi :

$$\begin{array}{l} \text{Frottement dû aux} \\ \text{chocs entre les} \\ \text{particules et la paroi} \end{array} = K_{s,p} (1-\epsilon) u_s^2 \quad (1.31)$$

La perte de charge due au frottement du solide par unité de volume est donc :

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = K_{s,p} (1-\epsilon) u_s^2 + K_{ss} (1-\epsilon)^2 u_s^2 \quad (1.32)$$

Comme nous le verrons par la suite cette présentation de JA-MIN-CHEN est satisfaisante car elle permet d'analyser s'il y a des effets électrostatiques et des frottements solide-solide.

Par contre tous les autres auteurs se sont limités comme nous l'avons vu à exprimer la perte de charge dans le tube de transport en fonction d'un facteur de frottement global défini différemment suivant chaque auteur.

1-4 - EFFETS ELECTROSTATIQUES

Les charges électrostatiques ont pour origine le frottement des surfaces de différente nature où le frottement de surfaces de même nature, mais dont l'état physique n'est pas le même.

Dans le cas du transport pneumatique les charges électrostatiques ont pour origine les chocs entre les particules mêmes et les chocs entre les particules et la paroi.

A cause de leurs charges électrostatiques les particules collent à la paroi, phénomène observé par WEN et HASHINGER (30), MITLIN (18), CULGAN (5), RICHARDSON et Mc LEMAN (21), JA-MIN-CHEN (12) et MEHTA (17). Pour supprimer cette charge ils ont utilisé différentes techniques, la plus répandue consiste à humidifier le gaz transporteur, ce qui le rend plus conducteur de l'électricité et favorise ainsi la décharge des particules solides ; une autre technique consiste à envelopper le tube de transport avec un fil conducteur (18) ou à utiliser uniquement des tubes métalliques.

En présence de phénomènes électrostatiques la perte de charge est plus forte que dans le cas où il n'y a pas d'effets électrostatiques.

Le phénomène électrostatique se manifeste de préférence à faibles concentrations du solide et diminue au fur et à mesure que la concentration augmente et il est plus important aux fortes vitesses. Ces conclusions ont été données par RICHARDSON et Mc LEMAN (21) et par JA-MIN-CHEN (12) ; ce dernier auteur, toujours par utilisation d'un modèle de chocs, aboutit à la formule :

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{\text{élect.}} = K_{el} (1-\epsilon) u_s^2 \quad (1.33)$$

ce qui revient à dire que la perte de charge due à l'effet électrostatique a la même forme analytique que la perte de charge normale due aux chocs des particules et de la paroi.

CONCLUSION

Deux revues récentes (3), (19) soulignent la complexité des phénomènes intervenant en transport pneumatique et le nombre considérable de régimes opératoires que recouvre cette appellation unique. C'est ainsi que le régime (disons plutôt les régimes) que nous nous sommes proposés d'étudier (faible vitesse et forte concentration) a été très peu exploré et que les deux études existantes sont elles-mêmes fragmentaires.

Les études effectuées en transport pneumatique en phase diluée couvrent elles-mêmes des régimes très différents et l'existence de relations uniques semble a priori exclue. Les résultats expérimentaux fournis par les différents auteurs ne permettent pas jusqu'ici d'obtenir une vue claire du problème. Ils sont parfois incomplets parce que la vitesse de glissement n'a pas été mesurée, la mesure de cette vitesse étant délicate à grande vitesse. Le nombre de systèmes étudiés a été également très limité car il n'est pas toujours très facile de varier le diamètre du tube, la granulométrie, la vitesse du solide, la nature du gaz porteur. Certains résultats sont par ailleurs imprécis car les effets électrostatiques n'ont pas toujours été supprimés ou contrôlés et que certains auteurs n'ont pas tenu compte de l'effet de la zone d'accélération.

En prenant les précautions voulues il est cependant possible, comme l'ont montré RICHARDSON et Mc LEMAN pour le transport horizontal d'obtenir des données précises et reproductibles. Des travaux récents (12,13,26,28) montrent que le transport vertical en phase diluée est actuellement très étudié et les auteurs de ces études soulignent l'importance des applications potentielles des réacteurs et sécheurs à transport pneumatique.

CHAPITRE II

TRAITEMENT THEORIQUE

PLAN

<u>2.1 - BILAN DE MATIERE</u>	p. 2-1
2.1.1 - Phase gazeuse	p. 2-1
2.1.2 - Phase solide	p. 2-1
<u>2.2 - BILAN DE QUANTITE DE MOUVEMENT</u>	p. 2-1
2.2.1 - Phase gazeuse	p. 2-2
2.2.2 - Phase solide	p. 2-3
2.2.3 - Suspension gaz-solide	p. 2-4
<u>2.3 - BILAN D'ENERGIE</u>	p. 2-4
2.3.1 - Phase gazeuse	p. 2-5
2.3.2 - Phase solide	p. 2-5
2.3.3 - Suspension gaz-solide	p. 2-6
<u>2.4 - RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE TRAINEE $\overline{C_D}$, LA VITESSE DE GLISSEMENT Δu, ET LE FROTTEMENT DU AU SOLIDE $F_{f.S}$</u>	p. 2-7

Nous pouvons représenter notre appareil d'une façon schématique par la figure 2.

Dans le tube de transport nous observons deux zones : la première dite zone d'accélération dans laquelle le solide est accéléré et la deuxième dite zone de régime établie où la vitesse du solide reste constante.

Nous établirons les bilans de matière, de quantité de mouvement et d'énergie dans le cas particulier du régime permanent et sans réaction chimique.

2-1 - BILAN DE MATIERE

Nous dénotons par G le débit massique ; par Q le débit volumique ; par ρ la densité et par u la vitesse et nous affectons de l'indice s les propriétés du solide et par g celles de l'air

2-1-1 - PHASE GAZEUSE

Si nous faisons le bilan de matière entre les sections AA et BB, nous obtenons :

$$G_{gA} = G_{gB} = \text{cste} \quad (2.1)$$

où G_g est donné par :

$$G_g = \int_{\Omega} \rho_g \epsilon u_g d\Omega = 2\pi \int_0^R \rho_g \epsilon u_g r dr \quad (2.2)$$

où ϵ représente la fraction en volume de la phase gazeuse, et Ω est la section du tube. Si nous prenons des grandeurs moyennes sur une section, nous avons :

$$G_g = u_g \Omega \rho_g \epsilon \quad (2.3)$$

où u_g et ϵ sont moyennés sur la section. Dans ce qui suit toutes les grandeurs que nous utiliserons seront des grandeurs moyennes.

2-1-2 - PHASE SOLIDE

Pour le solide nous obtenons :

$$G_s = \rho_s (1-\epsilon) \Omega u_g = \text{constante} \quad (2.4)$$

2-2 - BILAN DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT

En régime permanent le principe de la conservation de la quantité de mouvement appliqué à un volume de contrôle découpé dans une région de l'espace traversé par un écoulement, se réduit à :

Débit net de la quantité
de mouvement à travers
la surface de contrôle

=

Résultante des forces
extérieures qui
agissent sur le volume

ce qui peut encore s'écrire sous la forme :

$$\Delta (D.Q.M.) = F_R \quad (2.5)$$

2-2-1 - PHASE GAZEUSE

Nous ferons l'analyse pour la zone d'accélération et pour la zone de régime établi.

2-2-1-1 - Zone d'accélération

Le débit de quantité de mouvement qui entre par la section AA est formé par le débit de quantité de mouvement de l'air de l'alimentateur, plus le débit de quantité de mouvement de la fraction de l'air de fluidisation qui passe dans le tube de transport. Si V_A est la vitesse moyenne à laquelle l'air sort de l'alimentateur et u_{gA} la vitesse moyenne de l'air venant du bac, nous pouvons écrire :

$$(D.Q.M.)_A = G_{gl} V_A + (G_g - G_{gl}) u_{gA} \quad (2.6)$$

Le débit de la quantité de mouvement qui sort par la section BB est :

$$(D.Q.M.)_B = G_g u_{gB} \quad (2.7)$$

d'où

$$\Delta(D.Q.M.) = G_g u_{gB} - G_{gl} V_A - (G_g - G_{gl}) u_{gA} \quad (2.8)$$

La résultante des forces extérieures est la somme des quatre termes :

- F_P Forces de pression qui agissent sur le volume gazeux
- F_g Forces de gravité
- F_{fg}^c Forces de frottement exercées sur le flux gazeux par la paroi du tube
- F_{sg}^c Forces exercées par le solide sur le volume gazeux

Donc :

$$F_R = F_P + F_g + F_{fg} + F_{sg} \quad (2.9)$$

La force de pression qui agit sur le volume gazeux est :

$$F_P = - \Omega \Delta(P\epsilon) \quad (2.10)$$

La force de gravité est :

$$F_g = \int_{z_A}^{z_B} \rho_g \epsilon \Omega g dz \quad (2.11)$$

Pour évaluer cette intégrale, il faudrait connaître la variation de ϵ en fonction de z . Remplaçant tous ces termes dans l'expression (2.9) et combinant avec (2.8) il vient :

$$G_g u_{gB} - G_{gl} V_A - (G_g - G_{gl}) u_{gA} = -\Omega \Delta(P\epsilon) - \int_{z_A}^{z_B} \rho_g \epsilon \Omega dz + F_{fg} + F_{sg} \quad (2.12)$$

2-2-1-2 - Zone de régime établi

Dans la zone de régime établi, en négligeant l'expansion du gaz et en tenant compte du fait que ϵ est constant, nous obtenons :

$$-\Omega \epsilon \Delta P - \rho_g \epsilon g \Omega (z_C - z_B) + F_{fg} + F_{sg} = 0 \quad (2.13)$$

d'où :

$$-F_{sg} = [-\Delta P - \rho_g g (z_C - z_B)] \epsilon \Omega + F_{fg} \quad (2.14)$$

$-F_{sg}$ représente la force de traînée que le gaz exerce sur le solide. Nous verrons par la suite qu'il est commode de définir un coefficient moyen de traînée $\bar{C}_D$, de telle sorte que si N est le nombre de particules solides contenues dans le volume de contrôle, nous avons :

$$\bar{C}_D N \pi \frac{d^2}{4} \times \left[\frac{1}{2} \rho_g \epsilon (u_g - u_s)^2 \right] = -F_{sg} \quad (2.15)$$

où $\rho_g \epsilon$ masse du gaz contenue dans l'unité de volume u du tube de transport.

Mais N est égal à :

$$N = (1-\epsilon) (z_B - z_D) \Omega / (\pi d_p^3 / 6) \quad (2.16)$$

volume occupé volume d'une
par le solide particule

d'où

$$\epsilon \bar{C}_D B \Delta u^2 (1-\epsilon) (z_B - z_D) \Omega = -F_{sg} \quad (2.17)$$

avec

$$B = \frac{3}{4} \frac{\rho_g}{d_p} \quad (2.18)$$

et

$$\Delta u = (u_g - u_s) \quad (2.19)$$

2-2-2 - PHASE SOLIDE

Les bilans de quantité de mouvement de la zone d'accélération et de la zone établie sont les suivants :

2-2-2-1 - Zone d'accélération

$$G_s (u_{sB} - u_{sA}) = -\Omega \Delta [P(1-\epsilon)] - \int_{z_A}^{z_B} \rho_s (1-\epsilon) g \Omega dz + F_{fs} + F_{gs} \quad (2.20)$$

où

F_{fs} est une force de frottement exercée sur le solide dont nous précisons plus tard la nature

F_{gs} est la force exercée par le gaz sur le solide et qui est donc égale et de signe contraire à la force exercée par le solide sur le gaz, c'est à dire :

$$F_{sg} + F_{gs} = 0 \quad (2.21)$$

2-2-2-2 - Zone établie

Pour la zone établie le bilan devient :

$$- F_{fs} = [-\Delta P - \rho_s g (z_C - z_B)] \Omega (1-\epsilon) + F_{fs} \quad (2.22)$$

2-2-3 - SUSPENSION GAZ-SOLIDE

En faisant la somme des bilans de chaque phase, nous obtenons :

2-2-3-1 - Zone d'accélération

Le bilan devient :

$$G_g u_{gB} - G_g v_{gA} - (G_g - G_l) u_{gA} + G_s (u_{sB} - u_{sA}) = -\Omega \Delta P - \int_{z_A}^{z_B} [\rho_g \epsilon + \rho_s (1-\epsilon)] g \Omega dz + F_{fs} + F_{fg} \quad (2.23)$$

2-2-3-2 - Zone établie

Nous obtenons dans ce cas :

$$- F_{fs} = -\Omega \Delta P - [\rho_s (1-\epsilon) + \rho_g \epsilon] g \Omega (z_C - z_B) + F_{fg} \quad (2.24)$$

2-3 - BILAN D'ENERGIE

Le premier principe de la thermodynamique appliqué à une tranche différentielle du tube de transport, nous donne :

$$dE = \delta q + \delta w \quad (2.25)$$

où dE représente la variation d'énergie totale du système par unité de temps et δq et δw représentent les quantités de chaleur et de travail reçues par le système dans l'unité de temps.

Le débit d'énergie totale en l'absence des effets électriques, magnétiques et de surface comprend les formes suivantes d'énergie :

$$\dot{E} = GU + G \frac{P}{\rho} + G \frac{1}{2} u^2 + Ggz = G \left[U + \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} u^2 + gz \right] \quad (2.26)$$

où

U est l'énergie interne par unité de masse

P/ρ est l'énergie de pression par unité de masse

$\frac{1}{2} u^2$ est l'énergie cinétique par unité de masse

gz est l'énergie potentielle de gravité par unité de masse

Appliquant le deuxième principe à un processus réversible et combinant (2.25) et (2.26), nous obtenons :

$$G \left[\frac{dP}{\rho} + d \left(\frac{1}{2} u^2 \right) + d (gz) \right] = \dot{\omega} \quad (2.27)$$

où $\dot{\omega}$ contient toutes les formes de travail sauf le travail d'expansion. L'intégration entre les limites 1 et 2 donne :

$$G \int_1^2 \frac{dP}{\rho} + \frac{G}{2} (u_2^2 - u_1^2) + Gg (Z_2 - Z_1) = \dot{\omega} \quad (2.28)$$

$\dot{\omega}$ représente le travail maximum que peut accomplir le système par unité de temps, mais s'il y a frottement le travail accompli par le système sur l'environnement par unité de temps est :

$$\dot{\omega}_e = \dot{\omega} - \dot{\omega}_f \quad (2.29)$$

où $-\dot{\omega}_e$ est le travail accompli par le système sur l'environnement par unité de temps

$-\dot{\omega}_f$ est le travail perdu par frottement par unité de temps donc (2.28) devient :

$$G \left[\int_1^2 \frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2} (u_2^2 - u_1^2) + g (Z_2 - Z_1) \right] = \dot{\omega}_e + \dot{\omega}_f \quad (2.30)$$

2-3-1 - PHASE GAZEUSE

Nous appliquerons l'expression (2.30) à la zone d'accélération et à la zone établie.

2-3-1-1 - Zone d'accélération

Compte tenu du fait que l'air qui entre dans la zone d'accélération est formé par deux courants, l'expression (2.30) devient :

$$G_g \left[\int_A^B \frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2} \left(u_B^2 - \frac{G_{g1}}{G_g} v_A^2 - \frac{G_g - G_{g1}}{G_g} u_{gA}^2 \right) + g (Z_B - Z_A) \right] = \dot{\omega}_g + \dot{\omega}_{g.f} \quad (2.31)$$

2-3-1-2 - Zone établie

Pour la zone établie, nous obtenons :

$$G_g \int_B^C \frac{dP}{\rho} + G_g (Z_C - Z_B) g = \dot{\omega}_g + \dot{\omega}_{g.f} \quad (2.32)$$

où

$\dot{\omega}_g$ représente le travail accompli par le gaz par unité de temps

$-\dot{\omega}_{g.f}$ représente l'énergie dégradée en frottement à la paroi par le gaz, par unité de temps.

2-3-2 - PHASE SOLIDE

L'application de (2.30) à la zone d'accélération et à la zone établie donne les formules qui suivent.

2-3-2-1 - Zone d'accélération

$$G_S \frac{P_B - P_A}{\rho_S} + \frac{G_S}{Z} (u_{S_B}^2 - u_{S_A}^2) + G_S g(Z_B - Z_A) = \dot{w}_S + \dot{w}_{S.f} \quad (2.33)$$

2-3-2-2 - Zone établie

$$G_S \frac{P_C - P_B}{\rho_S} + G_S g(Z_C - Z_B) = \dot{w}_S + \dot{w}_{S.f} \quad (2.34)$$

où $-\dot{w}_{S.f}$ représente l'énergie dégradée en frottement par le solide par unité de temps

$\dot{w}_S$ représente le travail reçu par le solide par unité de temps.

2-3-3 - SUSPENSION GAZ-SOLIDE

Si le transfert d'énergie entre la phase gazeuse et la phase solide est parfait, le travail accompli par le gaz ($-\dot{w}_g$) est égal au travail reçu par le solide ($\dot{w}_S$)

$$\dot{w}_S + \dot{w}_g = 0 \quad (2.35)$$

Mais si le transfert n'est pas parfait il y a une dégradation de l'énergie en plus de la dégradation produite par le frottement du solide et du gaz avec la paroi, donc :

$$-\dot{w}_g = \dot{w}_S + \dot{w}_{g.S} \quad (2.36)$$

où $\dot{w}_{g.S}$ représente l'énergie dégradée par le transfert d'énergie entre la phase gazeuse et la phase solide

2-3-3-1 - Zone d'accélération

Pour la zone d'accélération nous obtenons en tenant compte de (2.36) :

$$G_g \left[\int_A^B \frac{dP}{\rho_g} + \frac{1}{2} (u_{g_B}^2 - \frac{G_{g1}}{G_g} v_A^2 - \frac{G_g - G_{g1}}{G_g} u_{g_A}^2) + g(Z_B - Z_A) \right] + G_S \left[\int_A^B \frac{dP}{\rho_S} + \frac{1}{2} (u_{S_B}^2 - u_{S_A}^2) + g(Z_B - Z_A) \right] = \dot{w}_{g.f} + \dot{w}_{S.f} - \dot{w}_{g.S} \quad (2.37)$$

2-3-3-2 - Zone établie

Pour la zone établie, nous obtenons :

$$G_g \left[\int_B^C \frac{dP}{\rho_g} + g(Z_C - Z_B) \right] + G_S \left[\int_B^C \frac{dP}{\rho_S} + g(Z_C - Z_B) \right] = -\dot{w}_{g.S} + \dot{w}_{g.f} + \dot{w}_{S.f} \quad (2.38)$$

Comme nous le démontrons dans l'annexe (1) cette énergie dégradée vaut pour la zone de régime établie :

$$\dot{\omega}_{g.S} = -F_{S.g} (u_g - u_S) \quad (2.39)$$

2-4 - RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE TRAÎNÉE $\overline{C_D}$, LA VITESSE DE GLISSEMENT Δu ,
ET LE FROTTEMENT DU AU SOLIDE $F_{f.S}$

En éliminant $(-\Delta P)$ entre les expressions (2.14) et (2.24) nous obtenons pour la force de traînée exercée par le gaz sur le solide dans la zone de régime établi :

$$-F_{S.g} = [(\rho_S - \rho_g) (Z_C - Z_B) (1 - \epsilon) g - F_{f.S}] \epsilon + F_{f.g} (1 - \epsilon) \quad (2.40)$$

Cette expression peut se simplifier avec les considérations suivantes :

a) Pour les systèmes gaz-solide, nous avons :

$$\rho_S \gg \rho_g \quad (2.41)$$

b) $-F_{f.g}$ est la force de frottement que le gaz exerce sur la paroi du tube, force que nous supposons égale à la force de frottement qu'exerce le gaz quand il n'y a pas de transport de solide, c'est à dire, le frottement normal d'un gaz dans un tube cylindrique. Nous la calculons donc par l'expression suivante :

$$-F_{f.g} = f_g \frac{2}{D} \rho_g u_g^2 \Omega (Z_C - Z_B) \epsilon \quad (2.42)$$

où le facteur de frottement est donnée par la formule de BLASIUS (2) :

$$f_g = 0,0791 \text{ Re}_g^{-0.25} \quad \text{pour } 2,1 \times 10^3 < \text{Re}_g < 10^5 \quad (2.43)$$

où

$$\text{Re}_g = \frac{Du_g \rho_g}{\eta_g}$$

L'expression (2.40) devient :

$$-F_{S.g} = [(\rho_S g - f_g \frac{2}{D} \rho_g u_g^2) \Omega (1 - \epsilon) (Z_C - Z_B) - F_{f.S}] \epsilon \quad (2.44)$$

Mais

$$\rho_S g \gg f_g \frac{2}{D} \rho_g u_g^2 \quad (2.45)$$

En effet un calcul rapide nous donne pour une vitesse de l'air

$$u_g = 15 \text{ [mts/sec]}$$

la valeur :

$$f_g \frac{2}{D} \rho_g u_g^2 = 12 \text{ [dynes/cm}^2\text{]} \quad (2.46)$$

et nous savons que :

$$\rho_S g = 1039 \text{ [dynes/cm}^3\text{]} \quad (2.47)$$

Dans tout le domaine de vitesse que nous avons étudié, nous pouvons donc écrire :

$$-F_{S,g} = [\rho_{S,g} \Omega (1-\epsilon) (Z_C - Z_B) - F_{f,S}] \epsilon \quad (2.48)$$

En divisant par le poids de solide contenu dans le volume de la zone établie, nous obtenons :

$$S \cdot \epsilon = \frac{-F_{S,g}}{\rho_{S,g} \Omega (1-\epsilon)} = \left[1 + \frac{1}{\rho_{S,g} \Omega (1-\epsilon)} \left(\frac{-F_{f,S}}{\Omega (Z_C - Z_B)} \right) \right] \epsilon \quad (2.49)$$

où $(S \cdot \epsilon)$ est la force de traînée exercée par le gaz sur l'unité de poids de solide contenu dans la zone établie.

Remplaçant la valeur de $-F_{S,g}$ donnée par (2.17), nous avons donc :

$$S \cdot \epsilon = \frac{3}{4} \frac{\rho_g}{\rho_S} \cdot \frac{\epsilon C_D \Delta u^2}{d_p g} = \left[1 + \frac{1}{\rho_{S,g} \Omega (1-\epsilon)} \left(\frac{-\Delta P}{\Delta z} \right)_{f,S} \right] \epsilon \quad (2.50)$$

avec

$$\left(\frac{-\Delta P}{\Delta z} \right)_{f,S} = \frac{-F_{S,f}}{\Omega (Z_C - Z_B)}$$

gradient de pression dû au frottement du solide.

Expression qui nous donne la relation entre le coefficient de traînée $\overline{C_D}$, la vitesse de glissement Δu , et le frottement dû au solide. Comme on le voit ces trois grandeurs sont liées par une relation.

Pour des faibles variations de Δu , nous admettons que $\overline{C_D}$ est de la forme :

$$\overline{C_D} = k \Delta u^{-n} \quad (2.51)$$

où k et n sont deux coefficients que nous supposons constants. Il convient de remarquer que ces deux coefficients ne peuvent pas être déterminés à partir de la courbe standard car comme nous l'avons vu à forte concentration cette courbe n'est plus utilisable. k et n sont donc fonction de la concentration en solide.

Nous écrivons donc :

$$k \Delta u^{2-n} = \frac{4}{3} \frac{\rho_S d_p g}{\rho_g} S \quad (2.52)$$

d'où

$$\Delta u = \left[\frac{4}{3} \frac{\rho_S d_p g}{\rho_g k} \right]^{1/2-n} S^{1/2-n} \quad (2.53)$$

Le nombre adimensionnel S représente le poids et le frottement dû au solide, et à concentration du solide constant dans le tube S croît avec le

frottement. Cette expression nous montre que la vitesse de glissement pourrait être une fonction croissante de la vitesse du gaz puisque une augmentation de cette vitesse se traduit par une augmentation du frottement dû au solide, donc de S .

CHAPITRE III

PARTIE EXPERIMENTALE

PLAN

<u>3.1 - APPAREILLAGE</u>	p. 3-1
3.1.1 - Bac de fluidisation	p. 3-1
3.1.2 - Transporteur	p. 3-1
3.1.3 - Dispositif de mise en recirculation du solide	p. 3-2
3.1.4 - Dispositif de contrôle et de mesure (fig. 3)	p. 3-2
3.1.5 - Dispositif de pulsation de l'air de transport	p. 3-3
<u>3.2 - MODE OPERATOIRE</u>	p. 3-3
3.2.1 - Mise en marche	p. 3-3
3.2.2 - Mesures	p. 3-3
3.2.3 - Conditions expérimentales	p. 3-4

Pour établir les correlations dont il a été parlé dans l'exposé théorique, il faut déterminer expérimentalement trois grandeurs :

- le gradient de pression
- la concentration en solide
- le débit de solide

Nous avons choisi un appareil permettant d'opérer en continu sans avoir à recharger le solide avant chaque essai.

3-1 - APPAREILLAGE

Notre installation représentée de façon schématique sur la figure 3 est constituée de quatre parties.

3-1-1 - BAC DE FLUIDISATION

Ce bac à plusieurs fonctions importantes :

- Il permet d'établir un joint empêchant la fuite de l'air par le tube de retour en continu du solide. Certains auteurs travaillant également en continu utilisent pour cela une vis sans fin.

- Il remplace l'alimentateur vibrant qu'on peut également utiliser pour doser la quantité de solide et permet un dosage très précis par variation de la pression dans le bac.

- Il permet surtout d'alimenter le solide très régulièrement sur toute la section du tube de transport et dans un état de dispersion très grand, ce qui se traduit par une diminution de la longueur de la zone d'accélération. En effet certains systèmes parfois utilisés conduisent à des agglomérats de solide tombant le long de la paroi et la zone d'accélération a alors aussi pour fonction de détruire ces agglomérats et de répandre le solide sur toute la section.

Le bac de fluidisation est un récipient cylindrique de 40 cm de hauteur et 20 cm de diamètre en P.V.C. transparent, muni d'une plaque de teflon poreux assurant une bonne distribution de l'air de fluidisation.

Il a deux entrées d'air, l'une pour l'air de fluidisation, l'autre pour l'air de transport. Dans la partie supérieure il y a quatre raccords : un pour le tube de transport, juste au centre du bac ; un autre pour le tube de retour ; un autre pour le changement du solide dans le bac, et un quatrième pour l'échappement de l'air de fluidisation.

3-1-2 - TRANSPORTEUR

Le transporteur est formé du tube de transport et de l'alimentateur. Nous avons utilisé deux types d'alimentateurs : un alimentateur dit "périphéri-

que" et un alimentateur dit "central".

La coupe schématique des deux alimentateurs est dessinée sur la figure 5a pour l'alimentateur périphérique, et sur la figure 5b pour l'alimentateur central. la surface hachurée représente la surface de passage de l'air de transport.

La géométrie et les dimensions de l'alimentateur périphérique sont données sur la figure 6 : cet alimentateur nous permet de faire varier la surface de passage de l'air de transport, simplement en vissant ou dévissant la pièce G.

L'alimentateur central est un tube de cuivre placé dans l'axe du tube de transport, figure 7.

Le tube de transport est une colonne de verre de 5,8 mts de hauteur et 3 cm de diamètre intérieur, muni de 10 prises de pression espacées le long du tube de transport, la première se trouvant à 5 cm de la partie inférieure du tube, la deuxième à 60 cm de la première, les cinq suivantes espacées à 45 cm et les trois dernières à 90 cm.

Pour mesurer la concentration du solide nous utilisons deux vannes à boisseau sphérique de même diamètre de passage que le diamètre intérieur du tube. La première vanne se trouve à 3,70 mts de la partie inférieure du tube, et la deuxième vanne à 1,63 mts de la première, distance mesurée entre les axes des vannes. Les deux vannes sont raccordées entr'elles par des tiges métalliques de telle sorte que l'ouverture ou la fermeture des vannes se fait de façon solidaire.

3-1-3 - DISPOSITIF DE MISE EN RECIRCULATION DU SOLIDE

Le tube de transport débouche sur un cyclone en P.V.C. transparent, muni d'un sac de dépoussiérage ; ils séparent l'air qui échappe à l'atmosphère et le solide qui lui retombe par le pied du cyclone dans le tube de retour du solide. Le tube plonge dans le lit fluidisé, ce qui forme comme il a été dit un joint "hydraulique" qui permet de maintenir une surpression sur le lit fluidisé.

3-1-4 - DISPOSITIF DE CONTROLE ET DE MESURE (Fig. 3)

Les débits d'air de fluidisation et de transport sont contrôlés par les robinets A et B respectivement et mesurés par les diaphragmes I et II qui sont branchés aux manomètres C et D. L'étalonnage des diaphragmes a été effectué avec un compteur à gaz de capacité 20 m³/hr.

L'air de fluidisation qui échappe est contrôlé par le robinet F et mesuré par la perte de charge dans le tube H étalonnée d'avance. C'est le robinet F qui contrôle l'air de fluidisation qui échappe du bac qui nous permet de créer une surpression sur le lit fluidisé.

Les prises de pression ont un diamètre de 4 mm et nous avons mis à l'intérieur une toile de tamis pour empêcher le solide de sortir, comme cela est représenté sur la figure 8.

Le liquide manométrique que nous utilisons est, soit de l'eau, soit du mercure.

Afin de mesurer le débit de solide nous avons construit une vanne à glissière. Cette vanne installée entre le pied du cyclone et le tube de retour permet de recueillir et de peser le solide transporté pendant un temps donné.

3-1-5 - DISPOSITIF DE PULSATION DE L'AIR DE TRANSPORT

Un robinet à boisseau équipé des points toriques et relié à un moteur à vitesse variable a été intercalé entre la source d'air comprimé et l'entrée de l'air de transport. Le débit pulsé est encore mesuré par un diaphragme de mesure mais afin d'éliminer l'effet des pulsations sur la mesure du débit de l'air de transport une grande capacité a été placée entre le diaphragme et le robinet rotatif. Nous avons vérifié au compteur à gaz, que l'effet des pulsations sur la mesure est ainsi négligeable.

3-2 - MODE OPERATOIRE

3-2-1 - MISE EN MARCHE

Nous ouvrons le robinet A qui contrôle l'air de fluidisation et nous mesurons le débit au moyen du diaphragme I. grâce au robinet F nous pouvons régler le débit d'air de fluidisation qui échappe et par conséquent nous pouvons fixer une pression statique déterminée sur le lit fluidisé, pression que nous mesurons au niveau de l'alimentateur. Grâce au tube H nous connaissons la quantité d'air qui échappe et nous pouvons donc calculer par différence la quantité d'air de fluidisation qui passe par le tube de transport.

Une fois que le lit est bien fluidisé, nous ouvrons donc le robinet E et nous ajustons le débit d'air de transport à la valeur préalablement choisie, après avoir fait la correction pour tenir compte de la quantité d'air de fluidisation qui entre dans le tube de transport.

3-2-2 - MESURES

Quand l'appareil est en régime à la vitesse d'air de transport et à la pression statique choisies, nous mesurons le profil de pression le long du tube de transport grâce aux prises de pression. Nous mesurons ensuite le débit de solide, pour cela nous faisons glisser la vanne à glissière et nous recueillons le solide dans un intervalle de temps donné. Pour mesurer la concentration

de solide dans le tube de transport nous fermons rapidement les deux vannes à boisseau sphérique qui se trouvent montées sur le tube de transport et nous pesons le solide recueilli.

3-2-3 - CONDITIONS EXPERIMENTALES

Des expériences préliminaires nous ont démontré que la vitesse de l'air de fluidisation ne joue aucun rôle au delà d'une certaine valeur minimale, qui se trouve être égale à la vitesse minimale de fluidisation du solide, soit 3 cm/sec. Nous avons donc travaillé à une vitesse de fluidisation de 5 cm/sec.

Comme solide nous avons utilisé du polystyrène sulfoné de densité $\rho_s = 1,06$ grms/cm³. Nous avons effectué une analyse granulométrique du solide dont le résultat est donné sous la forme de graphique dans la figure 9. Nous voyons que le solide a un diamètre compris entre 250 μ et 500 μ avec un diamètre moyen de 380 μ , défini par la relation :

$$\bar{d}_p = \frac{\sum d_{pi}^3 x_i}{\sum d_{pi}^2 x_i}$$

où $\bar{d}_p$ diamètre moyen du lot de particules

x_i fraction des particules qui ont un diamètre d_{pi}

Dans notre étude nous avons fait varier la vitesse de l'air de transport, la pression statique sur le lit fluidisé et le type d'alimentateur. Les intervalles de variation ont été les suivants :

a) Alimentateur périphérique

Vitesse de l'air de transport	2,5 mts/sec à 10 mts/sec
Pression statique (P-Pat)	10 cm H ₂ O à 100 cm H ₂ O
Aire de passage de l'alimentateur	25 à 116 mm ²

b) Alimentateur central

Vitesse de l'air de transport	2,5 à 15 mts/sec
Pression statique (P-Pat)	10 à 100 cm H ₂ O
Diamètre de l'alimentateur	12 mm

Avec l'alimentateur central nous avons entrepris une étude de l'effet des pulsations forcées de l'air de transport dans les conditions expérimentales suivantes :

c) Régime pulsé

Vitesse de l'air de transport	2,5 à 5,0 mts/sec
Pression statique (P-Pat)	10 cm H ₂ O à 80 cm H ₂ O
Fréquence des pulsations	5,1 à 12,8 (Hertz)
Diamètre de l'alimentateur	12 mm

A titre d'exemple nous donnons les résultats expérimentaux obtenus dans une expérience type :

Fente de l'alimentateur 25 mm^2
 Vitesse nominale de l'air de transport $u' = 5 \text{ mts/sec}$
 Vitesse d'air de fluidisation $u_f = 5 \text{ cm/sec}$
 Débit d'air de fluidisation $Q_0 = 1,57 \text{ lts/sec}$
 Débit d'air qui échappe du bac $Q_3 = 1,06 \text{ lts/sec}$
 Débit d'air vers l'alimentateur $Q_1 = 3,03 \text{ lts/sec}$
 Pression atmosphérique $P_{at} = 732 \text{ mm Hg}$
 Profil de pression le long du tube

Prise n°	P-Pat cm H ₂ O	<u>Débit de solide</u> (résultats de 3 mesures succes- sives)	
		Temps sec.	Poids grms
1	89.4		
2	73.8	10	2.170,00
3	68.0	10	2.150,00
4	63.0	10	2.140,00
5	58.0		
6	52.3	<u>Concentration dans le tube</u> (résultats de 3 me- sures successives)	
7	46.2		
8	35.5	(1-ε) %	
9	22.0	9,91%	
10	10.5	9,98%	
		9,82%	

Les pressions, les débits de solide et la concentration ont toujours été mesurés trois fois et dans les calculs nous avons utilisé la moyenne de ces trois mesures. Les pressions fluctuaient de $\pm 2 \text{ mm}$ d'eau. L'erreur relative sur la concentration peut être assez élevée aux concentrations faibles et atteindre 10 % car dans ces conditions la quantité de solide recueillie entre les vannes est faible.

CHAPITRE IV

ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

PLAN

<u>4.1 - ANALYSE DE LA PERTE DE CHARGE</u>	p. 4-1
<u>4.2 - ANALYSE DE LA VITESSE DU SOLIDE</u>	p. 4-4
<u>4.3 - COEFFICIENT DE TRAINEE</u>	p. 4-5
<u>4.4 - ANALYSE DE LA ZONE D'ACCELERATION</u>	p. 4-6
<u>4.5 - REGIME PULSE</u>	p. 4-8
4.5.1 - Frottement du solide	p. 4-8
4.5.2 - Vitesse du solide	p. 4-9
4.5.3 - Zone d'accélération	p. 4-9

L'examen des courbes donnant la perte de charge en fonction de la hauteur (fig. 10) montre que le gradient de pression devient constant après une certaine hauteur. Nous pouvons donc définir deux zones que nous appellerons zone stabilisée et zone d'accélération ; la zone d'accélération est de longueur variable et peut mesurer jusqu'à 3 mts.

Nous avons étudié l'effet des caractéristiques de l'alimentateur et des fluctuations forcées du débit d'air ; comme nous le verrons, ces effets sont notables dans la zone d'accélération.

4-1 - ANALYSE DE LA PERTE DE CHARGE

De l'expression (2.24) nous obtenons :

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right) = \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.g} + \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{p.g} + \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} + \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{p.s} \quad (4.1)$$

où

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right) = \text{gradient de pression dans la zone établie}$$

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.g} = \frac{-F_{f.g}}{\Omega(z_C - z_B)} \quad \text{perte de charge due au frottement du gaz par unité de volume de la zone établie}$$

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{p.g} = \rho_g \epsilon_g \quad \text{poids du gaz par unité de volume de la zone établie}$$

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = \frac{-F_{f.s}}{\Omega(z_C - z_B)} \quad \text{perte de charge due au frottement du solide par unité de volume de la zone établie}$$

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{p.s} = \rho_s g(1-\epsilon) \quad \text{poids du solide par unité de volume de la zone établie}$$

Pour souligner l'importance relative de chaque terme de l'expression (4.1) nous avons porté sur la figure 11 la variation de chaque terme en fonction de u_g , pour une concentration de solide de 5 %.

Sur cette figure nous remarquons que le poids du solide et le poids du gaz restent constants avec la variation de u_g et que le deuxième est négligeable par rapport au premier. Le frottement dû au gaz augmente légèrement avec la vitesse de l'air, mais il est toujours très inférieur au poids du solide, par contre le frottement dû au solide augmente fortement avec la vitesse de l'air et il devient rapidement comparable au poids du solide.

Nous appellerons perte de charge due à la présence du solide la somme du poids du solide et du frottement dû au solide, c'est à dire :

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_s = \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} + \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{p.s} \quad (4.2)$$

Si nous divisons par le poids du solide, nous obtenons :

$$\frac{1}{\rho_s(1-\epsilon)g} \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_s = 1 + \frac{1}{\rho_s(1-\epsilon)g} \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = S \quad (4.3)$$

où S est un nombre adimensionnel qui représente la perte de charge due au solide par unité de poids de solide.

Si nous adoptons l'analyse de JA-MIN-CHEN (12) pour le frottement du solide, nous obtenons :

$$S = 1 + \frac{K_{s.p}}{\rho_s g} u_s^2 + \frac{K_{el}}{\rho_s g} u_s^2 + \frac{K_{s.s}}{\rho_s g} u_s^2 (1 -) \quad (4.4)$$

où

$\frac{K_{s.p}}{\rho_s g} u_s^2$ représente le frottement dû aux chocs solide-paroi par unité de poids du solide

$\frac{K_{el}}{\rho_s g} u_s^2$ représente le frottement dû aux effets électrostatiques par unité de poids du solide

$\frac{K_{s.s}}{\rho_s g} u_s^2$ représente le frottement dû aux chocs solide-solide par unité de poids du solide

Sur la figure 12, nous avons porté S en fonction de $(1-\epsilon)$. Sur cette figure nous remarquons que pour une vitesse de l'air de transport donnée et pour des concentrations inférieures à 1 %, S a une valeur constante, mais pour des concentrations comprises entre 1 % et 2 % la valeur de S diminue, et atteint une nouvelle valeur qui reste constante pour des concentrations supérieures à 2 %.

Nous constatons aussi que la diminution de S est plus nette au fur et à mesure que la vitesse de l'air augmente.

Ce comportement de S avec la concentration nous indique, premièrement que le frottement dû aux chocs entre les particules solides elles-mêmes est négligeable puisqu'il n'y a pas de terme proportionnel à $(1-\epsilon)$ et deuxièmement qu'à faibles concentrations ($(1-\epsilon) < 1$ %) se manifeste un frottement plus grand que celui qu'on observe aux fortes concentrations ($(1-\epsilon) > 2$ %).

Dans l'étude bibliographique nous avons vu que RICHARDSON et Mc LEMAN (21) et JA-MIN-CHEN (12) concluent que le phénomène électrostatique se manifeste de préférence à faible concentration et qu'il diminue au fur et à mesure que celle-ci augmente et que ce phénomène est plus important aux fortes vitesses. En accord avec ces auteurs nous dirons donc qu'aux faibles concentrations nous sommes en présence de phénomènes électrostatiques.

Pour mieux analyser le frottement dû au solide, nous avons porté sur la figure (13) $(-\Delta P/\Delta z)_{f.s}$ en fonction de la concentration $(1-\epsilon)$.

L'examen de la figure nous montre pour des concentrations inférieures à 1 %

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = a_4 (1-\epsilon) \quad (4.5)$$

et pour des concentrations supérieures à 1 %

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = a_5 (1-\epsilon) + b_5 \quad (4.6)$$

Nous retrouvons donc, l'absence de chocs entre les particules solides elles-mêmes, puisqu'il n'y a pas de terme en $(1-\epsilon)^2$.

Comme nous l'avons dit auparavant, à faibles concentrations le frottement dû au solide est formé du frottement dû aux effets électrostatiques et du frottement dû aux chocs solide-paroi, c'est à dire :

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = [K_{s.p} u_s^2 + K_{el} u_s^2] (1-\epsilon) \quad (4.7)$$

donc

$$a_1 = K_{s.p} u_s^2 + K_{el} u_s^2 \quad (4.8)$$

Pour des concentrations supérieures à 1 % l'effet électrostatique devient constant et c'est seulement le frottement dû aux chocs particule-paroi qui augmente avec la concentration, c'est à dire :

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = K'_{s.p} u_s^2 (1-\epsilon) + K'_{el} u_s^2 \quad (4.9)$$

soit en comparant avec (4.6) :

$$\begin{aligned} a_2 &= K'_{s.p} u_s^2 \\ b_2 &= K'_{el} u_s^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Le traitement de nos données expérimentales par regression linéaire multiple nous donne :

$$\begin{aligned} a_1 &= 4.66 \times 10^{-3} u_s^2 \\ a_2 &= 2.32 \times 10^{-2} u_s^{1.64} \\ b_2 &= 5.04 \times 10^{-4} u_s^{1.48} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Nous constatons qu'aux faibles concentrations le frottement est proportionnel à u_s^2 comme le prévoit le modèle de JA-MIN-CHEN mais pour des concentrations au-delà de 1 % nous obtenons un exposant 1.64. Cette diminution de l'exposant peut être expliquée par le raisonnement suivant : l'exposant 2 prévu par le modèle provient du fait que JA-MIN-CHEN a supposé que la vitesse radiale des particules est proportionnelle à la vitesse axiale des particules. Cette supposition serait valable aux très faibles concentrations seulement, c'est à dire, quand entre deux chocs les particules peuvent acquérir la vitesse radiale u_r qui est en équilibre avec la vitesse axiale ; à mesure que la concentration augmente, le temps entre deux chocs diminue, donc la particule n'aura pas le temps suffisant pour atteindre la vitesse radiale d'équilibre, de ce fait u_r ne sera plus proportionnel à u_s , d'où la non concordance de notre exposant avec l'exposant prévu par la théorie.

Si nous exprimons le frottement du solide sous la forme d'un facteur de frottement défini par :

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = f_s \frac{2}{D} \rho_s (1-\epsilon) u_s^2 \quad (4.12)$$

Nous obtenons :

$$f_s = 6.6 \times 10^{-3} \quad \text{pour } (1-\epsilon) < 1 \% \quad (4.13)$$

et

$$f_s = 3.28 \times 10^{-2} u_s^{-0.36} + \frac{7.13 \times 10^{-4} u_s^{-0.52}}{(1-\epsilon)} \quad \text{pour } (1-\epsilon) > 1 \% \quad (4.14)$$

Sur la figure (14) nous avons porté le frottement dû aux effets électrostatiques, le frottement dû aux chocs entre le solide et la paroi et le frottement global en fonction de la concentration de solide. Nous constatons qu'à faible concentration les deux frottements sont comparables mais à fortes concentrations le frottement dû aux chocs solide-paroi est prédominant.

En conclusion nous pouvons donc dire que le gradient de pression dans la zone établie du tube de transport est formé de quatre termes : le poids et le frottement de l'air de transport et le poids et le frottement du solide. Les deux premiers sont négligeables par rapport aux deux derniers, sauf pour de très faibles concentrations où les quatre sont du même ordre de grandeur. Pour les faibles vitesses de l'air de transport (faibles vitesses du solide) et pour les concentrations fortes de frottement dû au solide est très inférieur à son poids, mais il augmente rapidement avec la vitesse de l'air et peut devenir supérieur à son poids. A faibles concentrations le frottement est dû aux effets électrostatiques et aux chocs solide-paroi, et pour les fortes concentrations c'est le dernier qui prédomine.

A faible concentration nos résultats sont en accord avec le modèle proposé par JA-MIN-CHEN et le frottement dû au solide est proportionnel à u_s^2 et le facteur de frottement obtenu est égal à 6.6×10^{-3} et est comparable à ceux trouvés par JA-MIN-CHEN (12), HARIU et MOLSTAD (9) et STEMERDING (26), qui trouvent aussi un facteur de frottement de l'ordre de 10^{-3} et indépendant de la vitesse du solide. Le facteur de frottement à forte concentration dépend de la vitesse du solide, et il est inférieur au facteur de frottement obtenu à faibles concentrations.

4-2 - ANALYSE DE LA VITESSE DU SOLIDE

La vitesse du solide est calculée par l'expression :

$$u_s = \frac{G_s}{\rho_s (1-\epsilon) \Omega} \quad (4.15)$$

et elle est portée sur la figure 15 en fonction de u_g . Nous avons essayé une corrélation linéaire multiple entre u_s et les variables u_g et $(1-\epsilon)$ et nous avons trouvé :

$$u_s = 0,93 u_g - 569 (1-\epsilon) - 160 \quad (4.16)$$

ce qui nous donne une vitesse de glissement :

$$\Delta u = 0.07 u_g + 569 (1-\epsilon) + 160 \quad (4.17)$$

La vitesse de chute d'une particule unique est obtenue en faisant $u_g = 0$ et $(1-\epsilon) = 0$ ce qui donne :

$$\Delta u = 160 \text{ cm/sec} \quad (4.18)$$

Cette vitesse correspond à la vitesse de chute libre d'une particule de 380μ , ce qui est bien le diamètre moyen de notre solide, comme nous l'avons vu précédemment.

A faible concentration l'effet de celle-ci est négligeable, et l'expression (4.16) devient :

$$u_s = 0.93 u_g - 160 \quad (4.19)$$

résultat qui n'est pas en désaccord avec les résultats de HELLINCX et ROMPAY (11) qui trouvent également une expression semblable, où le coefficient de u_g est inférieur à l'unité, mais qui est apparemment en désaccord avec les autres auteurs (9,13,20,22,26,29), qui trouvent ce coefficient étant égal à un.

A forte concentration nous ne pouvons pas faire de comparaison avec les données de la littérature puisque les auteurs qui ont étudié la vitesse de glissement n'ont jamais travaillé à des concentrations plus fortes que 1 %.

Notre expression donnant une dépendance de la vitesse de glissement avec la concentration n'est pas en désaccord avec les résultats obtenus par REDDY et PEI (20) qui travaillant à faibles concentrations ont trouvé que la vitesse de glissement est une fonction croissante de la concentration.

Dans l'exposé théorique, nous avons montré que :

$$\Delta u = S^{1/2-n} \left[\frac{4}{3} \frac{\rho_s d_p g}{\rho_g k} \right]^{1/2-n} \quad (4.20)$$

c'est à dire Δu croît avec S et comme S croît avec u_g , puisque le frottement du solide augmente avec la vitesse de transport, il en résulte que Δu est une fonction croissante de u_g , conclusion qui semble bien confirmée par l'expression (4.16).

4-3 - COEFFICIENT DE TRAÎNÉE

Le coefficient de traînée a été calculé à partir de l'expression :

$$\overline{C_D} = \frac{4}{3} \frac{\rho_s g d_p}{\rho_g} \frac{S}{\Delta u^2} \quad (4.21)$$

Sur les figures 16,17,18,19, nous avons porté les valeurs de C_D en fonction de la concentration du solide, à nombre de Reynolds de la particule constant, défini par :

$$Re_p = \frac{\rho_g d_p}{\eta_g} \Delta u \quad (4.22)$$

Nous constatons que le coefficient de traînée diminue avec la concentration, mais prend une valeur constante à forte concentration ; cette valeur limite dépend du nombre de Reynolds de la particule.

Sur la figure 20 nous avons porté cette valeur limite du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds ; sur le même graphique nous avons tracé la courbe standard du coefficient de traînée d'une particule sphérique en fonction du nombre de Reynolds.

Nous voyons que nos valeurs ne tombent pas sur la courbe standard et en plus la variation de $\overline{C_D}$ avec le nombre de Reynolds est plus forte que la variation donnée pour la courbe standard.

Pour des nombres de Reynolds compris entre 30 et 45, nous voyons que nos points expérimentaux se placent au-dessus de la courbe standard et l'inverse se produit pour des Reynolds supérieure à 45.

Nous avons vu dans l'étude bibliographique que MEHTA (17) et FREDDERMANN et HANSON (7) ont trouvé aussi une forte chute du coefficient de traînée dans l'intervalle du nombre de Reynolds compris entre 10 et 100 ; d'après TOROBIN et GAUVIN (27), cette chute du coefficient de traînée peut être expliquée par la modification de la couche limite qui entoure la particule. STEINOUR (25) considère qu'à partir d'une concentration de 2 % la présence d'autres particules perturbe la couche limite d'une particule donnée.

4-4 - ANALYSE DE LA ZONE D'ACCELERATION

a) Bilan de la quantité de mouvement

De l'expression (2.23) nous obtenons :

$$G_{g1} V_A + (G_g - G_{g1}) u_{gA} - G_g u_{gB} - \Omega \Delta p = \int_{Z_A}^{Z_B} [\rho_g \epsilon + \rho_s (1-\epsilon)]_g dz + G_s (u_{sB} - u_{sA}) - F_{fg} - F_{fs} \quad (4.23)$$

Le membre de gauche représente la quantité de mouvement totale fournie à la zone d'accélération par le gaz et par les forces de pression, que nous appellerons : φ_{QM} , d'où :

$$\varphi_{QM} = G_{g1} V_A + (G_g - G_{g1}) u_{gA} - G_g u_{gB} - \Omega \Delta p \quad (4.24)$$

comme

$$u_{sB} \gg u_{sA}$$

et

$$\rho_s (1-\epsilon) \gg \rho_g \epsilon$$

nous obtenons donc :

$$\varphi_{QM} = G_s u_{sB} + \int_{Z_A}^{Z_B} g \rho_s (1-\epsilon) dz - F_{f.g} - F_{f.s} \quad (4.25)$$

Nous pouvons définir une concentration moyenne dans la zone d'accélération telle que :

$$\overline{(1-\epsilon)} = \frac{\int_{z_A}^{z_B} (1-\epsilon) dz}{(z_B - z_A)} \quad (4.26)$$

Si nous exprimons cette concentration moyenne comme :

$$(1-\epsilon) = (1-\epsilon_B) \quad (4.27)$$

où $(1-\epsilon_B)$ représente la concentration de la zone stabilisée donc β est donné par :

$$\beta = \frac{\int_{z_A}^{z_B} (1-\epsilon) dz}{(z_B - z_A)(1-\epsilon_B)} \quad (4.28)$$

La perte de charge totale par frottement $-(F_{fs} + F_{fg})$, peut être exprimée comme une fraction de la quantité de mouvement acquise par le solide par unité de temps, d'où :

$$-(F_{fs} + F_{fg}) = \gamma G_s u_{sB} \quad (4.29)$$

L'expression (4.24) devient donc :

$$\psi_{QM} = G_s u_{sB} + \beta \rho_s (1-\epsilon_B) \Omega_g (z_B - z_A) + \gamma G_s u_{sB} \quad (4.30)$$

d'où

$$\chi = \frac{\psi_{QM}}{G_s u_{sB}} = \left[(1+\gamma) + \beta \frac{g(z_B - z_A)}{u_{sB}^2} \right] \quad (4.31)$$

χ est le rapport entre la quantité de mouvement fournie à la zone d'accélération par unité de temps et la quantité de mouvement acquise par le solide par unité de temps

γ est le rapport entre la quantité de mouvement perdue par frottement par unité de temps et la quantité de mouvement acquise par le solide par unité de temps

$\beta \frac{g(z_B - z_A)}{u_{sB}^2}$ est le rapport entre le poids du solide dans la zone d'accélération et la quantité de mouvement acquise par le solide par unité de temps

Sur la figure 21 nous avons porté χ en fonction de $g(z_B - z_A)/u_{sB}^2$.

Si nous traçons une droite moyenne, nous obtenons les valeurs suivantes :

$$\bar{\gamma} = 0.50$$

$$\bar{\beta} = 1.8$$

ce qui donne une variation pour χ de $\pm 15 \%$.

Ces valeurs de $\bar{\gamma}$ et $\bar{\beta}$ nous indiquent qu'en moyenne les pertes par frottement représentent 50 % de la quantité de mouvement nécessaire pour accélérer le solide et qu'en moyenne la zone d'accélération est 1.8 fois plus dense que la zone établie.

Nous constatons aussi qu'il n'y a pas de tendance particulière avec la vitesse du gaz du transport et avec les différents alimentateurs non plus. Ce fait nous indique que la performance de la zone d'accélération est en première approximation indépendante du type d'alimentateur que nous avons utilisé dans notre étude.

b) Bilan d'énergie

Dans l'exposé théorique nous avons vu que $\dot{\omega}_{g_s}$ représentait l'énergie dégradée par le transfert d'énergie entre la phase gazeuse et la phase solide, et $-\dot{\omega}_{f_s}$ représentait l'énergie dégradée par le frottement dû au solide. Nous appellerons énergie dégradée par le solide, la somme de ces deux quantités :

$$E_{f.s} = \dot{\omega}_{g_s} - \dot{\omega}_{f.s} \quad (4.32)$$

où $E_{f.s}$ est l'énergie dégradée par le solide et que nous la calculons à partir de l'expression (2.37).

Sur la figure 22 nous avons porté $E_{f.s}/\Omega$ en fonction du débit de solide G_s et nous obtenons pour l'énergie dégradée par frottement l'expression suivante :

$$E_{f.s} = 0.56 \times 10^6 G_s \text{ (erg/sec)} \quad (4.33)$$

avec

G_s en grms/sec

Nous constatons de nouveau que l'énergie perdue par frottement dû au solide ne dépend pas du type d'alimentateur utilisé.

4-5 - REGIME PULSE

Dans ce paragraphe nous analysons la vitesse et le frottement du solide dans la zone stabilisée et nous la comparons aux résultats obtenus dans le cas de régime non pulsé.

4-5-1 - FROTTEMENT DU SOLIDE

Nous avons construit le tableau qui suit, en portant le frottement dû au solide par unité de poids du solide (S-1), en fonction de la concentration du solide (1- ϵ) et pour les différentes vitesses d'air de transport et les différentes fréquences de pulsation étudiées :

u_g m/ sec	12.8 (Hertz)		6.7 (Hertz)		5.1 (Hertz)		Non pulsé	
	(1- ϵ)	S-1	(1- ϵ)	S-1	(1- ϵ)	S-1	(1- ϵ)	S-1
3.0			1.38 9.33	0.03 0.04	8.48 0.12		(1- ϵ) > 1 %	0.04
4.0	1.02	0.15	0.90	0.36	1.18	0.37	(1- ϵ) < 1 %	0.24
	2.10	0.16					(1- ϵ) > 1 %	0.12
5.0	0.76	0.28	0.83	0.50	1.13	0.30	(1- ϵ) < 1 %	0.47
	2.56	0.40	2.70	0.48	3.49	0.31	(1- ϵ) > 1 %	0.23

L'examen de ce tableau nous indique qu'à une fréquence donnée, le frottement dû au solide par unité de poids de solide (S-1) a la même valeur dans tout le domaine de concentration considérée, sauf pour la fréquence de 12.8 (Hertz) et une vitesse de 5.0 mts/sec qui présente une augmentation du frottement avec la concentration.

Malheureusement nous ne trouvons aucune tendance générale de la valeur de (S-1) avec la fréquence des pulsations.

Cependant la valeur de (S-1) aux pertes de concentrations pour le régime pulsé est en général plus grande que la valeur correspondante au cas de régime non pulsé, ce qui signifie que les pulsations ont augmenté le frottement dû au solide.

4-5-2 - VITESSE DU SOLIDE

Avec les données correspondantes au régime pulsé nous avons trouvé par regression linéaire multiple :

$$\text{où } u_s = 0.86 u_g - 1.7 (1-\epsilon) - 176 \quad (4.34)$$

$$\Delta u = 0.14 u_g + 1.7 (1-\epsilon) + 176 \quad (4.35)$$

Pour le cas de régime non pulsé, nous avons :

$$\text{où } u_s = 0.93 u_g - 569 (1-\epsilon) - 160 \quad (4.36)$$

$$\Delta u = 0.07 u_g + 569 (1-\epsilon) + 160 \quad (4.37)$$

Nous constatons d'une part que les pulsations réduisent l'effet de la concentration, le coefficient de $(1-\epsilon)$ tombant de 569 à 1.7, ce qui probablement est dû à une destruction des paquets de solide que nous observons en régime non pulsé. D'autre part, l'influence de la vitesse de l'air de transport sur la vitesse de glissement augmente.

D'après HELLINX (11) le coefficient qu'affecte u_g dans l'expression Δu tient compte du frottement des particules. De notre expression (4.35) pour le régime pulsé nous pouvons dire donc que les pulsations augmentent le frottement ; cette même conclusion nous l'avions déjà tirée de l'étude du frottement du solide dans le régime pulsé.

4-5-3 - ZONE D'ACCELERATION

L'effet le plus notable est la diminution de la longueur de la zone d'accélération par rapport au régime non pulsé. Dans celui-ci la longueur de la zone d'accélération varie entre 1.0 mts à 2.9 mts avec quelques cas au dessous de 1 m et pour le régime pulsé la longueur est comprise entre 0.0 mts à 1 m dans trois cas seulement cette longueur a été supérieure à 1 mt. (Voir tableau des résultats dans l'annexe).

CONCLUSION

Contrairement à ce que nous avons cru au début de cette étude, il n'y avait dans la littérature que très peu de données relatives au problème qui nous intéresse, c'est à dire relatives au transport pneumatique vertical à faible vitesse et forte concentration. C'est donc à notre connaissance la première fois que des lois sont présentées donnant le facteur de frottement et la vitesse de glissement pour ce système.

Nous n'avons pas effectué une étude systématique des paramètres et il n'est pas facile de varier systématiquement le diamètre du tube et la granulométrie et la nature du solide. Comme d'autre part nous ne pouvons pas disposer de données comparables fournies par des études antérieures, la mise au point d'un modèle complet s'avérerait donc à priori difficile. Nous avons repris les idées exprimées par JA-MIN-CHEN (12) à propos du transport pneumatique en phase diluée et le modèle ainsi présenté permet d'interpréter nos données obtenues tant à fortes concentrations qu'à faibles concentrations.

Afin de mettre au point un modèle plus complet du transport pneumatique vertical à phase dense il serait utile de varier la granulométrie et la densité du solide et sans doute également le diamètre du tube et la nature du gaz.

Notons également que notre étude a montré que les fluctuations forcées du débit de gaz modifiaient la vitesse de glissement ce qui pouvait être interprété par la destruction d'agglomérats. Ce phénomène mérite également d'être étudié plus longuement ainsi que tout autre phénomène qui permettrait d'analyser le comportement du milieu diphasique considéré, c'est à dire la formation et la destruction des agglomérats dans ce système.

NOTATIONS

A_0	Surface spécifique d'une particule	cm^{-1}
A, A_1	Constantes	adimensionnelles
A_2	Constant	cm/sec
B	Constant	grms/cm^4
B_1, B_2	Constant	cm/sec
C_D	Coefficient de traînée d'une particule unique	adimensionnel
$\overline{C_D}$	Coefficient de traînée moyenne d'un lot de particules	adimensionnel
D	Diamètre du tube de transport	cm
E	Débit d'énergie totale	ergs/sec
$E_{f.s}$	Energie dégradée par le solide par unité de temps	ergs/sec
F_R	Résultante des forces extérieures	dynes
F_p	Forces de pression	dynes
$F_{f.g}$	Force de frottement dû au gaz	dynes
$F_{f.s}$	Forces de frottement dû au solide	dynes
$F_{s.g}$	Force exercée par le solide sur le gaz	dynes
$F_{g.s}$	Force exercée par le gaz sur le solide	dynes
G_g	Débit massique du gaz dans le tube de transport	grms/sec
G_{g1}	Débit massique du gaz de l'alimentateur	grms/sec
G_s	Débit massique du solide dans le tube de transport	grms/sec
I_r	Intensité relative de turbulence	adimensionnel
K	Constant	$\text{cm}^3/(\text{grm} \times \text{sec}^2)$
$K_{s.p}$	Coefficient des chocs entre les particules et la paroi	grm/cm^4
K_{el}	Coefficient des chocs dus aux effets électrostatiques	grm/cm^4
$K_{s.s}$	Coefficient des chocs entre les particules mêmes	grm/cm^4
N	Nombre total des particules	
P	Pression	dynes/cm^2
$(-\Delta P/\Delta z)$	Gradient total de pression	dynes/cm^3
$(-\Delta P/\Delta z)_{p.g}$	Poids du gaz par unité de volume du tube	dynes/cm^3
$(-\Delta P/\Delta z)_{p.s}$	Poids du solide par unité de volume du tube	dynes/cm^3
$(-\Delta P/\Delta z)_{f.g}$	Perte de charge due aux frottements du gaz par unité de volume du tube	dynes/cm^3
$(-\Delta P/\Delta z)_{f.s}$	Perte de charge due au frottement du gaz par unité de volume du tube	dynes/cm^3

$(-\Delta P/\Delta z)_f$	Perte de charge due au frottement du gaz et du solide par unité de volume du tube	dynes/cm ³
$(-\Delta P/\Delta z)_s$	Perte de charge due à la présence du solide	dynes/cm ³
Re_p	Nombre de Reynolds de la particule	adimensionnel
$(Re_p)_c$	Nombre de Reynolds critique de la particule	adimensionnel
Re_g	Nombre du Reynolds du gaz	adimensionnel
Re_m	Nombre du Reynolds modifié	adimensionnel
S	Perte de charge due à la présence de solide par unité de poids de solide	adimensionnel
U	Energie interne par unité de masse	ergs/grms
V_A	Vitesse de l'air à la sortie de l'alimentateur	cm/sec
Z	Distance verticale	cm
a_1, a_2	Constantes	dynes/cm ³
b_2	Constante	dynes/cm ³
d_p	Diamètre d'une particule	cm
$\bar{d}_p$	Diamètre moyen d'un lot de particules	cm
$f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_9$	Facteurs de frottement	adimensionnel
f_s	Facteur de frottement du solide	adimensionnel
g	Accélération de gravité	cm/sec ²
k_0	Constant	adimensionnel
k	Constant	(cm/sec) ⁿ
k_1	Coefficient de perte de quantité de mouvement par choc	choc ⁻¹
k_2	Coefficient de fréquence de chocs entre les particules mêmes par unité de volume	chocs/cm ⁴
k_3	Coefficient de fréquence de chocs entre les particules et la paroi par unité de volume	chocs/cm ⁴
n	Exposant de l'expression du coefficient de traînée	adimensionnel
m_p	Masse d'une particule	gm
$\dot{q}$	Débit d'énergie thermique	ergs/sec
r	Exposant dans l'expression de f_2	
u_g	Vitesse du gaz dans le tube de transport	cm/sec
u_p	Vitesse de chute libre d'une particule	cm/sec
u_s	Vitesse du solide	cm/sec
Δu	Vitesse de glissement	cm/sec
u'_r	Fluctuation de la vitesse radiale des particules	cm/sec

u'_s	Fluctuation de la vitesse axiale des particules	cm/sec
ω	Débit d'énergie sous la forme de travail	erg/sec
$\dot{\omega}_e$	Débit d'énergie utilisable sous la forme de travail	erg/sec
$\dot{\omega}_f$	Energie perdue par frottement par unité de temps	erg/sec
$\dot{\omega}_g$	Travail accompli par le gaz par unité de temps	erg/sec
$\dot{\omega}_{g.f}$	Energie dégradée par frottement dû au gaz par unité de temps	erg/sec
$\dot{\omega}_{sf}$	Energie dégradée par frottement dû au solide par unité de temps	erg/sec
$\dot{\omega}_s$	Travail reçu par le solide par unité de temps	erg/sec
$\dot{\omega}_{g.s}$	Energie dégradée par le transfert d'énergie entre le gaz et le solide	erg/sec
z_{ss}	Fréquence des chocs entre les particules mêmes par unité de volume du tube de transport	chocs/(secxcm ³)
$z_{s.p}$	Fréquence des chocs entre les particules et la paroi par unité de volume du tube de transport	chocs/(secxcm ³)
α	Rapport entre le frottement total dans le tube et le frottement dû à la phase gazeuse	adimensionnel
β	Facteur de proportionnalité de la concentration de solide dans la zone d'accélération	adimensionnel
γ	Facteur de proportionnalité de la perte de quantité de mouvement dans la zone d'accélération	adimensionnel
ϵ	Fraction en volume de la phase gazeuse	adimensionnel
η_g	Viscosité de l'air	gm/(cmxsec)
ρ_g	Densité de l'air	gm/cm ³
ρ_s	Densité du solide	gm/cm ³
ψ_{QM}	Débit de quantité de mouvement totale fournie à la zone d'accélération	dynes
ϕ	Facteur de forme d'une particule	adimensionnel
χ	Rapport entre le débit de quantité de mouvement fournie à la zone d'accélération et la quantité de mouvement acquise par le solide par unité de temps	adimensionnel
Ω	Section du tube de transport	cm ²

BIBLIOGRAPHIE

- 1 BELDEN D.H. and KASSEL L.S. - Ind. Eng. Chem., 41, 1174 (1949)
- 2 BIRD B., STEWART W., LIGHTFOOT E. - "Transport Phenomena" Willy International, Edition (1964)
- 3 BOOTHROYD R.G. - Trans. Inst. Chem. Eng., 44, 306 (1966)
- 4 CHAMBERS J.W. - "Pressure Drop in the Vertical Transport of solids by Air", M.S. thesis, University of Pennsylvania, Philadelphia (1953)
- 5 CULGAN J.M. - Pneumatic conveying of Materials of Unity Density in A Three-Inch Pipe, Ph. D. thesis, Georgia Institute of Technology (1952)
- 6 FARBAR L. - Ind. Eng. Chem., 41, 1184 (1949)
- 7 FLEDDERMAN R.G. and HANSON A.R., U. Mich. Eng. Res. Inst. Rep. N. CM 667 (1951)
- 8 GOPICHAND T., SARMA K.J.R. and RAO M.N. - Ind. Eng. Chem., 51, 1449 (1959)
- 9 HARIU O.H. and MOLSTAD M.C. - Ind. Eng. Chem., 41, 1148 (1949)
- 10 HELANDER R.E. - "Flow Characteristics of Air-Solid System", Ph.D. Thesis, Northwestern University, (1956)
- 11 HELLINCKX L.J., Van ROMPAY P.V. - Compte rendu du 3ème congrès International de Chimie Industrielle (Sept. 1966), Industries chimiques belges (Editeur)
- 12 JA-MIN-CHEN - "Pressure Loss in Vertical Pneumatics Transport of Solids" Thesis Ph. D., University of Michigan (1963)
- 13 JONES J.H., BRAUN W.G., DAUBERT T.E. and ALLENDORF H.D. - A.I.Ch.E. Journal 12, 1070 (1966)
- 14 JONES J.H., BRAUN W.G., DAUBERT T.E. and ALLENDORF H.D. - A.I.Ch.E. Journal 13, 608 (1967)
- 15 LAPPLE C.E. and SHEPHERD C.B. - Ind. Eng. Chem., 32, 605 (1940)
- 16 LUNON R.G. - Proc. Roy. Soc. London, 118 A, 680 (1928)
- 17 MEHTA N.C. - "Effect of Solids Flow Rate and Particle Diameter on Pressure Drop in Pneumatic Transport System, Ph. D. Thesis, Purdue University, (1955)
- 18 MITLIN A. - Ph. D. Thesis, University of London, England (1952)
- 19 OWENS P.R. - Journal Fluid Mech., 39, 407 (1969)
- 20 REDDY K.V.S. and PEI D.C.T. - Ind. Eng. Chem., Fundamentals, 8, 490 (1969)
- 21 RICHARDSON J.F. and Mc LEMAN - Trans. Inst. Chem. Eng., 38, 257 (1960)
- 22 SEGLER W. - "Untersuchungen an Körnergeblasen und Grundlagen für ihre Berechnung" Mannheim Wiebold Co (1934)

- 23 SOO S.L. - "Fluids Dynamics of Multiphase Systems" Blaisdell Publishing Company (1967)
- 24 SOO S.L., IHRIG H.K., EL KOUL A.F. - Trans. A.S.M.E., J. Basic Eng. 82 D (3), 609 (1960)
- 25 STEINOUR H.H. - Ind. Eng. Chem., 36, 618 (1944)
- 26 STEMERDING S. - Chem. Eng. Sci. 17, 599 (1962)
- 27 TOROBIN L.B. and GAUVIN W.F. - A.I.Ch.E. Journal 7, 615 (1961)
- 28 Van ZONEN D. - Interaction Between Fluids and Particles, Inst. Chem. Eng. London (1962)
- 29 VOGT E.G. and WHITE R.R. - Ind. Eng. Chem., 40, 1731 (1948)
- 30 WEN C.Y. and HASHINGER R.F. - A.I.Ch.E. Journal, 6, 220 (1960)
- 31 ZENS F.A. - Ind. Eng. Chem., 41, 2801 (1949)

ANNEXE 1

Faisons le bilan de quantité de mouvement dans une tranche différentielle du tube transport :

a) Pour la phase gazeuse :

$$G_g \, d u_g = \Omega \, \epsilon \, dP - \Omega \, \epsilon \, \rho_g \, g \, dz + dF_{f.g} + dF_{s.g} \quad (AI-1)$$

b) Pour la phase solide :

$$G_s \, d u_s = - \Omega (1-\epsilon) \, dP - \Omega (1-\epsilon) \, \rho_s \, g \, dz + dF_{f.s} + dF_{g.s} \quad (AI-2)$$

Si nous multiplions la première équation par u_g et la deuxième par u_s , nous obtenons :

$$G_g \, \frac{1}{2} \, d u_g^2 = - \Omega \, \epsilon \, u_g \, dP - \Omega \, \epsilon \, \rho_g \, u_g \, g \, dz + u_g \, dF_{f.g} + u_g \, dF_{s.g} \quad (AI-3)$$

$$G_s \, \frac{1}{2} \, d u_s^2 = - \Omega (1-\epsilon) u_s \, dP - \Omega (1-\epsilon) \rho_s \, u_s \, g \, dz + u_s \, dF_{f.s} + u_s \, dF_{g.s} \quad (AI-4)$$

mais

$$G_g = \Omega \, \epsilon \, u_g \, \rho_g$$

$$G_s = \Omega \, (1-\epsilon) \, u_s \, \rho_s$$

donc

$$G_g \left[\frac{dP}{\rho_g} + \frac{1}{2} \, d u_g^2 + g \, dz \right] = u_g \, dF_{f.g} + u_g \, dF_{s.g} \quad (AI-5)$$

$$G_s \left[\frac{dP}{\rho_s} + \frac{1}{2} \, d u_s^2 + g \, dz \right] = u_s \, dF_{f.s} + u_s \, dF_{g.s} \quad (AI-6)$$

Dans le membre de gauche des deux expressions nous trouvons la variation d'énergie totale. Le terme $(-u_g \, dF_{f.g})$ est le travail effectué par la force $-dF_{f.g}$ dans l'unité de temps, donc il représente l'énergie dégradée par le gaz, par frottement à la paroi par unité de temps. Le terme $(-u_s \, dF_{f.s})$ représente l'énergie dégradée par le solide par frottement par unité de temps.

Ces deux termes correspondent donc à :

$$u_g \, dF_{f.g} = \delta \dot{w}_{f.g} \quad (AI-7)$$

$$u_s \, dF_{f.s} = \delta \dot{w}_{f.s} \quad (AI-8)$$

Le terme $(-u_g \, dF_{s.g})$ représente le travail accompli par la phase gazeuse par unité de temps.

Le terme $(u_s \, dF_{g.s})$ représente le travail reçu par la phase solide par unité de temps.

Comme nous savons que :

$$F_{s.g} + F_{g.s} = 0$$

nous voyons donc que en général ces deux travaux ne sont pas égaux, sauf si $u_g = u_s$.

La différence entre ces deux termes représente l'énergie dégradée par frottement entre la phase solide et la phase gazeuse.

Nous avons donc :

$$- u_g \, dF_{s.g} - u_s \, dF_{g.s} = \delta \dot{\omega}_{g.s} \quad (\text{AI-9})$$

d'où nous obtenons par intégration pour la zone d'accélération :

$$\dot{\omega}_{g.s} = \int_1^2 - (u_g - u_s) \, dF_{s.g} \quad (\text{AI-10})$$

et pour la zone de régime établie :

$$\dot{\omega}_{g.s} = - (u_g - u_s) \, F_{s.g} \quad (\text{AI-11})$$

RESULTATS EXPERIMENTAUX
Fente alimentateur 116 mm²

V _N mts/ sec.	Pat mm Hg	P _A cm H ₂ O	P _B cm H ₂ O	P _C cm H ₂ O	GS grs/ sec.	Q _{G1} lts/ sec.	Q _E lts/ sec.	Z _{ac} mts	ΔP/ΔZ dynes/ cm ³	(1-ε) %
2.5	734	10	5.4	1.4	7.17	1.77	1.77	2.9	13.42	1.40
3.0	734	10	5.5	1.8	9.17	2.12	2.12	2.5	10.68	1.08
4.0	742	10	5.7	2.0	12.33	2.83	2.83	2.5	10.97	0.76
4.8	742	10	5.4	1.6	14.89	3.40	3.40	2.6	11.56	0.65
6.0	742	10	6.0	2.1	16.50	4.24	4.24	2.9	12.93	0.49
8.0	742	10	7.6	3.0	15.33	5.66	5.66	2.9	15.38	0.35
10.0	742	10	8.8	3.4	14.78	7.07	7.07	2.9	18.03	0.23
2.5	742	20	13.5	2.9	15.67	1.77	1.77	2.1	28.02	2.59
3.0	742	20	13.3	3.4	19.67	2.12	2.12	2.2	26.26	2.34
4.0	742	20	12.4	4.4	26.78	2.83	2.83	2.5	23.52	1.60
6.0	742	20	10.8	4.0	37.11	4.24	4.24	2.9	23.22	1.21
8.0	742	20	12.5	4.4	39.56	5.66	5.66	2.9	27.04	0.90
10.0	742	20	14.3	5.6	35.00	7.07	7.07	2.9	29.20	0.53
2.5	740	40	34.6	3.6	22.00	1.55	1.77	0.5	56.05	5.70
3.0	740	40	33.6	3.6	38.89	1.90	2.12	0.5	55.27	5.07
4.0	735	40	26.9	2.5	76.33	2.61	2.83	1.5	56.05	4.74
5.0	735	40	26.4	4.2	97.56	3.32	3.54	1.0	45.08	3.65
6.0	735	40	23.0	4.0	103.11	4.04	4.24	2.0	49.00	3.11
7.0	730	40	25.4	5.0	112.33	4.75	4.95	1.0	41.55	2.45
10.0	725	40	21.8	7.0	86.00	6.85	7.07	2.9	49.78	1.80
2.5	730	60	51.6	4.8	40.44	1.55	1.77	0.5	86.24	10.15
3.0	730	60	47.0	4.8	73.33	1.90	2.12	1.0	86.24	9.16
4.0	730	60	30.0	4.8	113.56	2.61	2.83	2.9	84.28	6.98
5.0	730	60	28.4	5.2	143.33	3.23	3.54	2.9	78.98	5.13
6.0	730	60	32.4	6.2	167.50	3.93	4.24	2.0	67.42	3.92
8.0	725	60	27.0	6.6	161.67	5.35	5.66	2.8	57.23	2.75
10.0	725	60	28.4	8.4	144.66	6.85	7.07	2.9	67.28	2.59
2.5	725	80	68.2	5.4	70.26	1.46	1.77	0.5	116.03	11.32
3.0	725	80	62.0	5.2	107.00	1.80	2.12	1.0	116.03	10.75
4.0	725	80	52.8	6.0	152.67	2.50	2.83	1.6	109.17	9.18
6.0	725	80	40.4	7.2	219.52	3.81	4.24	2.3	92.12	5.64
8.0	725	80	33.6	9.6	220.00	5.35	5.66	2.9	81.53	4.22
10.0	725	80	39.0	11.2	208.00	6.77	7.07	2.3	77.61	3.71
2.5	725	100	84.2	6.4	105.67	1.40	1.77	0.5	144.25	14.40
3.0	725	100	81.0	6.0	119.60	1.72	2.12	0.7	144.25	13.31
4.0	725	100	64.0	7.2	189.04	2.43	2.83	1.6	132.10	9.79
6.0	725	100	45.6	6.6	276.00	3.74	4.24	2.8	120.93	6.95
8.0	725	100	46.0	12.0	275.00	5.07	5.66	2.5	101.13	5.23
10.0	725	100	45.0	12.4	250.00	6.67	7.07	2.7	101.13	4.74

Fente alimentateur 70 mm²

V _N mts/ sec.	Pat mm Hg	P _A cm H ₂ O	P _B cm H ₂ O	P _C cm H ₂ O	G _s grs/ sec.	Q _{R1} lts/ sec.	Q _g lts/ sec.	Z _{ac} mts	ΔP/ΔZ dynes/ cm ³	(1-ε) %
2.5	726	10	7.5	1.7	6.45	1.77	1.77	1.0	11.89	1.29
3.0	734	10	7.6	1.9	8.33	2.00	2.12	1.0	11.85	1.14
4.0	734	10	7.8	2.5	14.44	2.72	2.83	1.0	11.27	0.87
6.0	734	10	7.3	2.3	22.00	4.22	4.24	2.9	16.85	0.66
8.0	734	10	9.3	3.5	25.33	5.66	5.66	2.9	19.50	0.52
10.0	734	10	12.7	4.9	28.66	7.07	7.07	2.9	26.16	0.46
2.5	726	20	12.7	3.3	14.44	1.71	1.77	2.4	27.73	2.63
3.0	726	20	16.3	3.8	21.66	2.12	2.12	0.5	23.71	2.21
4.0	726	20	16.2	4.8	28.66	2.83	2.83	1.0	23.03	1.73
6.0	726	20	12.5	4.2	38.00	4.15	4.24	2.4	23.91	1.30
8.0	726	20	13.9	4.8	46.66	5.66	5.66	2.7	28.61	1.15
10.0	726	20	16.7	6.0	45.67	7.07	7.07	2.0	36.06	0.65
2.5	747	40	32.2	3.6	20.00	1.46	1.77	1.1	62.52	9.74
3.0	747	40	32.0	6.0	35.50	1.82	2.12	1.2	54.09	8.15
4.0	747	40	22.6	5.0	61.33	2.53	2.83	2.8	57.03	4.77
6.0	747	40	19.6	5.2	95.00	3.94	4.24	2.9	48.80	4.03
8.0	747	40	22.8	5.0	104.67	5.36	5.66	2.5	52.33	2.67
10.0	747	40	25.0	7.2	104.00	6.93	7.07	2.7	57.81	2.12
2.5	747	60	36.6	6.0	29.67	1.39	1.77	2.5	91.33	10.39
3.0	747	60	40.0	5.6	53.50	1.74	2.12	1.9	87.02	9.33
4.0	747	60	37.0	5.6	93.00	2.43	2.83	2.0	80.35	6.68
6.0	747	60	31.0	6.2	144.33	3.79	4.24	2.5	72.91	5.92
8.0	747	60	28.0	7.0	158.33	5.25	5.66	2.7	65.46	3.71
10.0	747	60	29.0	8.8	164.33	6.73	7.07	2.8	68.20	2.78
2.5	743	80	70.0	6.6	59.55	1.40	1.77	0.5	116.81	10.96
3.0	743	80	63.0	7.6	91.00	1.74	2.12	1.0	112.50	10.39
4.0	743	80	49.0	6.6	145.67	2.45	2.83	2.1	111.32	9.38
6.0	743	80	40.0	8.4	208.00	3.82	4.24	2.4	91.72	6.05
8.0	743	80	37.0	9.0	231.33	5.19	5.66	2.7	87.41	4.50
10.0	727	80	37.0	11.8	217.50	6.67	7.07	2.7	80.35	3.27
2.5	727	100	76.0	6.4	100.67	1.40	1.77	1.0	141.90	13.17
3.0	735	100	78.0	7.6	120.67	1.78	2.12	1.0	144.64	13.34
4.0	735	100	65.0	7.2	210.47	2.36	2.83	1.6	132.10	10.96
6.0	732	100	48.4	8.8	262.38	3.72	4.24	2.5	117.59	7.94
8.0	732	100	44.4	11.2	272.00	4.95	5.66	2.6	102.70	5.59
10.0	732	100	33.8	14.4	261.34	6.62	7.07	2.9	97.60	4.21

Fente alimentateur 47 mm²

V _N mts/ sec.	Pat mm Hg	P _A cm H ₂ O	P _B cm H ₂ O	P _C cm H ₂ O	G _s grs/ sec.	Q _{gl} lts/ sec.	Q _g lts/ sec.	Z _{ac} mts	ΔP/ΔZ dynes/ cm ³	(1-ε) %
2.5	724	10	8.3	1.6	6.00	1.65	1.77	0.7	12.64	1.13
3.0	724	10	9.8	1.7	8.66	2.00	2.12	1.0	14.30	1.18
4.0	724	10	8.6	2.7	18.33	2.71	2.83	2.0	15.28	1.06
6.0	726	10	12.2	4.5	37.33	4.18	4.24	2.0	19.60	0.94
8.0	726	10	14.5	4.8	48.00	5.60	5.66	2.9	32.43	0.96
10.0	726	10	20.4	6.8	56.33	7.07	7.07	2.9	45.47	0.94
2.5	726	20	15.0	2.5	16.00	1.75	1.77	2.0	31.65	2.94
3.4	726	20	14.0	4.8	31.50	2.40	2.42	2.4	27.04	2.43
4.0	726	20	14.2	4.5	38.75	2.81	2.83	2.4	28.32	2.42
6.0	726	20	19.2	4.8	62.00	4.24	4.24	1.0	29.39	1.82
8.0	726	20	23.7	5.6	78.00	5.66	5.66	0.7	30.86	1.63
9.0	726	20	21.2	6.4	83.00	6.36	6.36	2.5	43.12	1.47
2.5	738	40	33.8	3.2	24.00	1.55	1.77	1.0	61.93	5.81
3.0	738	40	30.2	4.8	35.33	1.87	2.12	1.5	58.01	5.40
4.0	738	40	26.8	5.2	61.55	2.56	2.83	2.0	55.66	4.66
6.0	738	40	20.6	4.6	103.35	3.99	4.24	2.9	54.09	3.32
8.0	738	40	23.0	5.9	121.33	5.47	5.66	2.5	49.97	2.45
2.5	738	60	48.4	4.2	34.67	1.52	1.77	1.0	89.76	9.33
3.0	738	60	40.0	4.8	60.33	1.87	2.12	1.9	88.20	8.10
4.0	738	60	36.0	6.2	104.00	2.58	2.83	2.2	80.35	6.68
6.0	738	60	29.0	5.4	158.00	3.99	4.24	2.9	79.96	5.30
8.0	738	60	42.6	8.0	181.00	5.41	5.66	1.0	70.16	3.71
2.5	746	80	64.0	4.8	48.16	1.46	1.77	1.0	121.32	12.25
3.0	746	80	56.0	4.8	87.33	1.78	2.12	1.7	122.10	11.27
4.0	746	80	45.0	7.2	145.60	2.49	2.83	2.5	111.91	9.41
6.0	746	80	38.4	7.0	211.00	3.80	4.24	2.9	106.62	7.20
8.0	746	80	38.4	10.2	236.67	5.26	5.66	2.9	95.25	5.26
2.5	746	100	78.0	4.8	69.16	1.41	1.77	1.0	149.35	14.20
3.0	740	100	56.0	4.8	114.00	1.72	2.12	2.6	160.32	14.59
4.0	740	100	70.0	8.8	166.33	2.38	2.83	1.6	142.49	11.93
6.0	740	100	48.0	9.0	254.80	3.64	4.24	2.9	131.71	9.14
8.0	740	100	48.0	12.0	282.66	5.06	5.66	2.9	118.77	6.65

Fente alimentateur 25 mm²

V _N mts/ sec.	Pat mm Hg	P _A cm H ₂ O	P _B cm H ₂ O	P _C cm H ₂ O	G _s grs/ sec.	Q _{pl} lts/ sec.	Q _g lts/ sec.	Z _{ac} mts	ΔP/ΔZ dynes/ cm ³	(1-ε) %
2.5	737	10	6.9	1.7	7.72	1.77	1.77	2.9	17.67	1.88
3.0	724	10	9.1	2.7	13.18	2.00	2.12	2.0	16.66	1.39
4.0	724	10	12.2	4.1	25.00	2.81	2.83	1.6	18.81	1.14
5.0	724	10	7.0	1.8	38.00	3.54	3.54	2.7	16.85	0.98
2.5	737	20	13.8	2.8	11.16	1.61	1.77	2.9	37.04	3.32
3.0	737	20	15.0	4.5	24.00	2.06	2.12	2.4	30.37	2.86
4.0	737	20	18.9	4.9	45.33	2.83	2.83	1.0	31.94	2.75
5.0	737	20	20.7	5.9	62.66	3.54	3.54	1.1	31.16	2.45
2.5	745	40	34.0	2.0	11.41	1.55	1.77	1.0	65.85	6.22
3.0	745	40	29.0	3.9	28.33	1.87	2.12	2.0	65.85	6.22
4.0	725	40	25.6	4.8	65.50	2.55	2.83	2.5	61.73	5.23
5.0	725	40	32.0	6.6	84.00	3.44	3.54	1.0	52.13	4.58
5.8	725	40	26.0	4.9	99.33	3.89	4.07	2.0	54.09	4.25
2.5	725	60	48.0	2.4	22.00	1.50	1.77	1.0	94.08	8.62
3.0	725	60	35.0	5.0	78.50	1.84	2.12	2.4	86.63	8.10
4.0	725	60	29.4	5.6	110.00	2.55	2.83	2.9	80.36	6.57
5.0	725	60	41.4	7.2	123.20	3.29	3.54	1.0	69.77	5.23
5.7	725	60	32.8	5.4	143.70	2.78	4.03	2.4	78.79	5.23
2.5	725	80	63.4	4.2	40.00	1.47	1.77	1.0	121.51	11.29
3.0	732	80	61.6	5.4	72.00	1.77	2.12	1.0	114.85	9.16
4.0	732	80	55.4	6.0	131.80	2.43	2.83	1.5	112.89	9.57
5.0	732	80	47.4	6.8	179.33	3.16	3.54	2.0	105.05	8.32
5.8	732	80	38.4	6.4	208.00	3.70	4.10	2.9	108.97	7.20
2.5	732	100	76.0	3.0	78.00	1.43	1.77	1.0	145.43	13.73
3.0	732	100	77.2	5.4	130.00	1.72	2.12	1.0	147.78	13.60
4.0	732	100	67.0	7.4	171.00	2.38	2.83	1.5	136.02	11.46
5.0	732	100	58.0	8.0	215.33	3.03	3.54	2.0	130.14	9.90
6.1	732	100	52.0	9.8	258.00	3.73	4.25	2.5	125.44	8.22

Alimentateur central fente 103 mm²

V _N mts/ sec.	Pat mm Hg	P _A cm H ₂ O	P _B cm H ₂ O	P _C cm H ₂ O	G _s grs/ sec.	Q _{gl} lts/ sec.	Q _g lts/ sec.	Z _{ac} mts	ΔP/ΔZ dynes/ cm ³	(1-ε) %
2.5	732	10	5.0	1.1	4.66	1.68	1.77	2.0	9.99	1.02
3.0	732	10	6.7	1.3	6.92	2.10	2.12	0.0	9.01	0.86
4.0	732	10	6.7	1.5	10.12	2.83	2.83	0.0	8.82	0.63
6.0	732	10	6.8	1.7	10.00	4.24	4.24	2.0	10.38	0.32
8.0	732	10	6.5	2.5	10.00	5.66	5.66	2.9	12.54	0.19
10.0	732	10	7.3	3.1	3.00	7.07	7.07	2.9	14.11	0.13
15.0	732	10	12.0	4.6	8.05	10.60	10.60	2.9	24.89	0.07
3.0	732	20	14.2	3.6	17.33	2.12	2.12	1.1	22.34	2.25
4.0	732	20	11.3	4.4	26.88	2.83	2.83	2.5	19.99	1.49
8.0	732	20	10.8	4.0	28.33	5.66	5.66	2.9	22.73	0.60
10.0	732	20	12.2	4.5	26.00	7.07	7.07	2.9	26.26	0.42
13.0	732	20	15.1	6.2	19.77	9.18	9.18	2.9	29.98	0.25
15.0	732	20	16.6	6.8	18.11	10.60	10.60	2.9	32.73	0.20
3.0	732	40	28.0	6.0	40.25	2.12	2.12	1.5	50.37	4.91
4.0	732	40	23.2	5.4	60.50	2.83	2.83	2.0	46.25	3.62
6.0	732	40	19.0	4.4	88.50	4.24	4.24	2.5	43.51	2.53
10.0	732	40	20.4	7.0	70.00	6.90	7.07	2.9	45.08	1.32
13.0	732	40	24.6	10.0	55.56	9.18	9.18	2.9	49.00	0.73
15.0	732	40	27.0	11.0	49.33	10.60	10.60	2.5	48.01	0.50
15.0	732	40	27.2	11.2	53.00	10.36	10.60	2.9	55.27	0.59
20.0	732	40	34.4	13.6	42.00	14.14	14.14	2.9	70.16	0.29
3.0	732	60	73.8	5.4	56.00	1.92	2.12	0.0	121.12	9.00
4.3	732	60	40.0	6.2	108.00	2.83	3.03	1.3	73.30	6.05
6.3	732	60	30.0	6.0	134.80	4.24	4.44	2.1	63.11	3.97
10.0	732	60	27.0	9.2	129.33	6.78	7.07	2.8	57.62	2.26
2.5	732	80	46.0	6.2	102.00	1.77	1.77	2.4	116.03	10.36
3.5	732	80	46.0	6.2	150.66	2.46	2.46	1.7	96.04	7.12
3.0	732	100	71.0	6.8	105.33	1.72	2.12	1.5	148.56	15.01

REGIME PULSE
Alimentateur central 103 mm²
12.8 (Hertz)

V _N mts/ sec.	Pat mm H _C	P _A cm H ₂ O	P _B cm H ₂ O	P _C cm H ₂ O	G _s grs/ sec.	Q _{g1} lts/ sec.	Q _g lts/ sec.	Z _{ac} mts	ΔP/ΔZ dynes/ cm ³	(1-ε) %
2.5	736	14	7.7	1.7	5.48	1.77	1.77	0.6	17.83	1.86
3.0	736	13	9.3	2.1	7.29	2.12	2.12	0.6	13.71	1.71
4.0	736	13	10.0	2.2	13.50	2.83	2.83	0.0	13.32	1.02
5.0	736	13	10.0	2.2	15.55	3.54	3.54	0.0	11.76	0.76
5.0	742	40	26.0	5.4	74.00	3.54	3.54	0.6	39.00	2.56
2.5	742	80	59.0	5.0	66.67	1.77	1.77	1.0	110.93	11.16
3.0	742	80	60.0	7.4	87.33	2.12	2.12	1.0	107.40	10.39
4.0	742	80	54.0	7.2	156.00	2.83	2.83	1.1	98.78	8.10
6.7 (Hertz)										
2.5	738	13	8.0	2.1	7.22	1.77	1.77	2.0	15.09	1.57
3.0	738	12	9.5	1.9	8.77	2.12	2.12	1.0	15.48	1.38
4.0	738	12	6.9	2.1	14.96	2.83	2.83	2.5	13.91	0.90
5.0	738	12	8.7	3.5	15.66	3.54	3.54	1.5	14.69	0.83
5.0	742	40	28.6	5.4	90.67	3.54	3.54	0.5	45.12	2.70
2.5	742	80	74.0	6.0	72.25	1.77	1.77	0.0	114.46	11.41
2.5	742	80	73.0	6.2	89.60	1.77	1.77	0.0	112.89	11.41
3.0	742	80	74.0	7.0	113.32	2.12	2.12	0.0	113.28	10.11
3.0	742	80	56.5	15.0	113.67	2.12	2.12	1.0	101.91	9.33
5.1 (Hertz)										
3.0	736	13	11.8	2.2	8.27	2.12	2.12	0.0	16.46	1.53
4.0	736	14	13.0	2.3	15.55	2.83	2.83	0.0	18.03	1.18
5.0	736	14	12.6	2.5	16.38	3.54	3.54	0.0	17.05	1.13
5.0	742	40	35.0	6.0	12.55	3.54	3.54	0.0	49.19	3.49
3.0	742	80	62.4	5.4	132.00	2.12	2.12	0.5	99.17	8.48

EXEMPLE DE CALCUL

Fente alimentateur 70 mm²
 Section tube transport 7.07 cm²
 Diamètre tube transport 3 cm
 Diamètre particules 380 μ

$$\begin{aligned} P_{at} &= 747 \text{ mm Hg} \\ (P_A - P_{at}) &= 40 \text{ cm H}_2\text{O} \\ (P_B - P_{at}) &= 19.6 \text{ cm H}_2\text{O} \\ (P_C - P_{at}) &= 5.2 \text{ cm H}_2\text{O} \\ G_s &= 95 \text{ grs/sec} \\ Q_{g1} &= 3.94 \text{ lts/sec} \\ Q_g &= 4.24 \text{ lts/sec} \\ Z_a &= 290 \text{ cm} \\ \left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right) &= 48.80 \text{ (dynes/cm}^3\text{)} \\ (1-\epsilon) \% &= 4.03 \% \end{aligned}$$

La pression moyenne dans la zone établie vaut :

$$\begin{aligned} \overline{P}_t &= 747 + \left(\frac{196+52}{2}\right)/13.6 \\ \overline{P}_t &= 756 \text{ mm Hg} \end{aligned}$$

$$u_g = \frac{4240}{7.07 \times 0.9597} \times \frac{760}{756} = 628 \text{ cm/sec}$$

$$u_s = \frac{95.00}{7.07 \times 1.06 \times 0.0403} = 315 \text{ cm/sec}$$

$$\Delta u = u_g - u_s = 628 - 315 = 313 \text{ cm/sec}$$

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.g} = f_g \frac{2}{D} \epsilon \rho_g u_g^2$$

$$f_g = 0.0791 \times Re_g^{-0.25}$$

$$Re_g = \frac{3 \times 628 \times 1.21 \times 10^{-3}}{18 \times 10^{-5}} = 12560$$

$$f_g = 0.0791 \times (12560)^{-0.25}$$

$$f_g = 7.48 \times 10^{-3}$$

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.g} = \frac{2}{3} \times 1.21 \times 10^{-3} \times 0.9597 \times 628^2 \times 7.48 \times 10^{-3} = 2.38 \frac{\text{dynes}}{\text{cm}^3}$$

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{p.s} = 1.06 \times 0.0403 \times 980 = 41.94 \frac{\text{dynes}}{\text{cm}^3}$$

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_s = 48.80 - 2.38 = 46.42 \frac{\text{dynes}}{\text{cm}^3}$$

$$S = \frac{46.42}{41.94} = 1.106$$

$$\left(-\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_{f.s} = 46.42 - 41.94 = 4.48 \frac{\text{dynes}}{\text{cm}^3}$$

$$\overline{C_D} = \frac{4\rho_s g d_p}{3\rho_g \Delta u^2} \frac{S}{\Delta u^2} = \frac{4 \times 1.06 \times 980 \times 380 \times 10^{-4} \times 1.106}{3 \times 1.21 \times 10^{-3} \times 313^2}$$

$$\overline{C_D} = 0.492$$

$$P_A = 747 + 400 / 13.6 = 776 \text{ mm Hg}$$

$$V_A = \frac{3240}{0.70} \times \frac{760}{776} = 5510 \text{ cm/sec}$$

Nous supposons la porosité du lit fluidisé égal à 0.50.

$$u_{EA} = \frac{(4 \ 240 - 3 \ 940)}{7.07 \times 0.5} \times \frac{760}{776} = 83 \text{ cm/sec}$$

$$(G_g - G_{g1}) u_{EA} = (4.24 - 3.94) \times 1.21 \times 83 = 0.03 \times 10^3 \text{ dynes}$$

$$G_g u_{EB} = 4.24 \times 1.21 \times 628 = 3.22 \times 10^3 \text{ dynes}$$

$$-\Delta P_a \Omega = (40 - 19.6) \times 980 \times 7.07 = 141.4 \times 10^3 \text{ dynes}$$

$$G_{g1} V_A = 3.94 \times 1.21 \times 5510 = 26.3 \times 10^3 \text{ dynes}$$

$$\psi_{QM} = [26.30 + 0.03 - 3.22 + 141.4] \times 10^3$$

$$\psi_{QM} = 164.51 \times 10^3 \text{ dynes}$$

$$G_s u_s = 95 \times 313 = 29.7 \times 10^3 \text{ dynes}$$

$$\chi = \frac{164.51 \times 10^3}{29.7 \times 10^3} = 5.56$$

$$\frac{\mathcal{E} \Delta z_a}{u_s^2} = \frac{980 \times 290}{313^2} = 2.90$$

$$\frac{1}{2} G_{g1} V_A^2 = 7.21 \times 10^7 \text{ erg/sec}$$

$$\frac{1}{2} (G_g - G_{g1}) u_{EA}^2 = 1.28 \times 10^3 \text{ erg/sec}$$

$$\frac{1}{2} G_g u_g^2 = 0.1 \times 10^7 \text{ erg/sec}$$

$$Q_g = 4240 \text{ cm}^3/\text{sec}$$

$$Q_s = \frac{25}{1.06} = 90 \text{ cm}^3/\text{sec}$$

$$Q_t = 4330 \text{ cm}^3/\text{sec}$$

$$-Q_t \Delta P = 4330 \times (40 - 19.6) \times 980 = 8.64 \times 10^7 \text{ ergs/sec}$$

$$\text{Energie totale fournie} = 7.21 \times 10^7 + 1.28 \times 10^3 = 0.1 \times 10^7 + 8.64 \times 10^7$$

$$\text{Energie totale fournie} = 15.75 \text{ ergs/sec}$$

$$\frac{1}{2} G_s u_s^2 = \frac{1}{2} \times 95 \times 315^2 = 4.71 \times 10^7 \text{ ergs/sec}$$

$$\varepsilon \Delta Z_a (G_g + G_s) = 980 \times 290 (95 + 4.24 \times 1.21) = 2.87 \times 10^7 \text{ erg/sec}$$

$$- \dot{w}_{fg} = \frac{G_{g1}}{2} (v_A - u_g)^2 = \frac{3.94 \times 1.21}{2} (5510 - 628)^2 = 5.66 \times 10^7 \text{ (erg/sec)}$$

$$E_{f.s} = 15.75 - (4.71 + 2.87 + 5.66) = 15.75 - 13.24$$

$$E_{f.s} = 2.51 \text{ erg/sec}$$

$$Re_p = \frac{d_p \rho_g}{\eta_g} \Delta u$$

$$Re_p = \frac{380 \times 10^{-4} \times 1.21 \times 10^{-3}}{18 \times 10^{-5}} \times 313$$

$$Re_p = 79.2$$

Figure 1

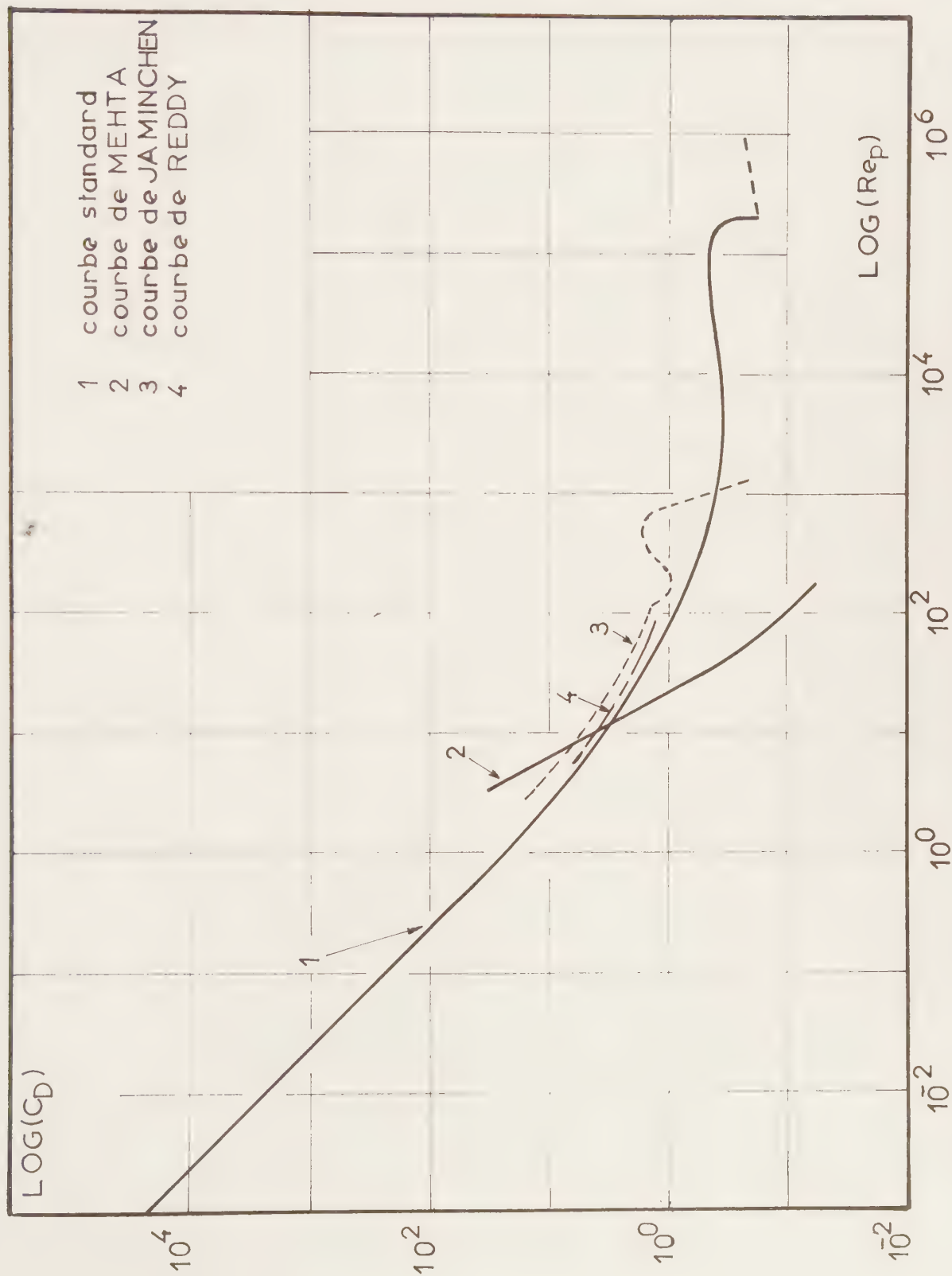


Figure 2

SCHEMA DE L'APPAREIL

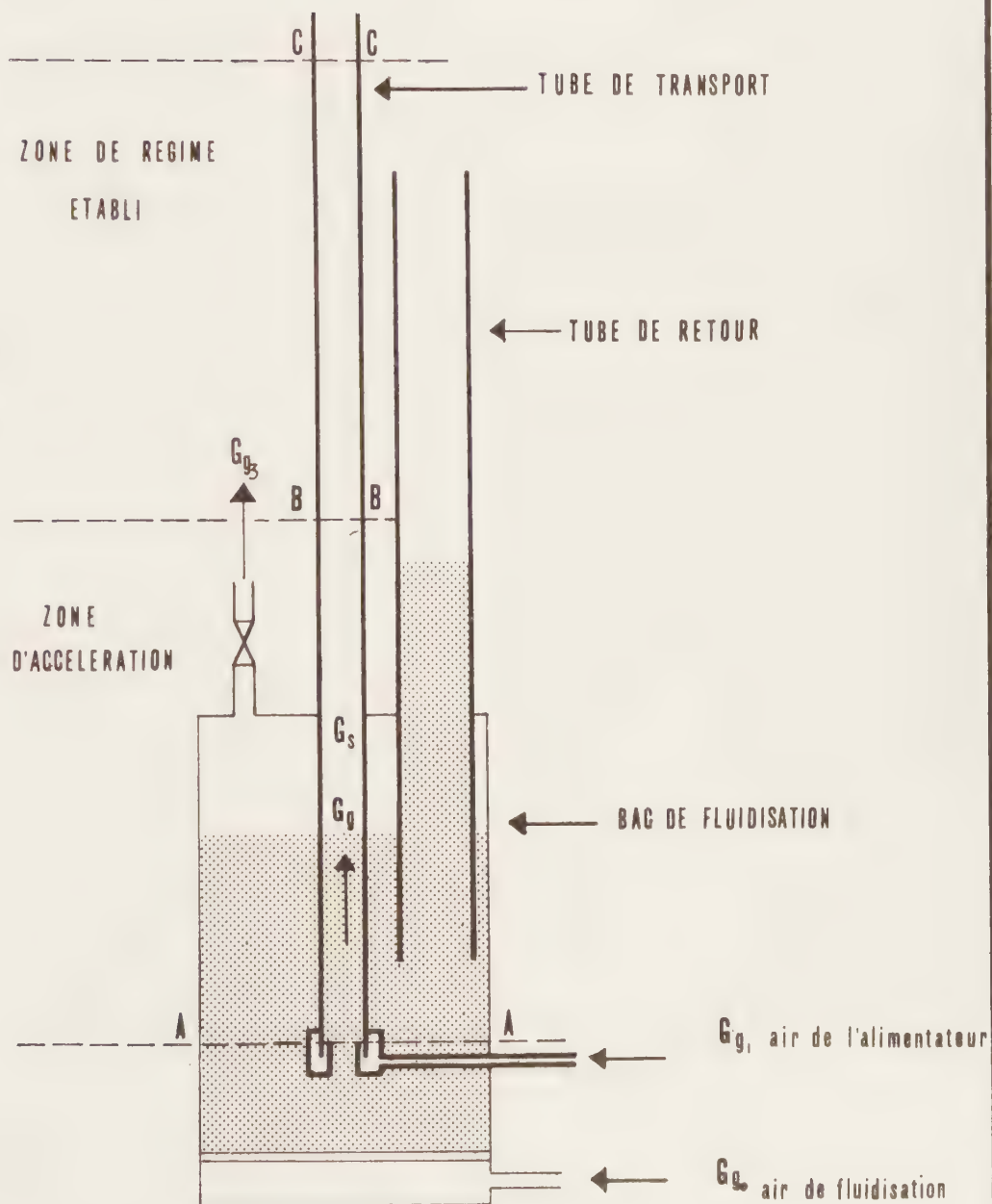
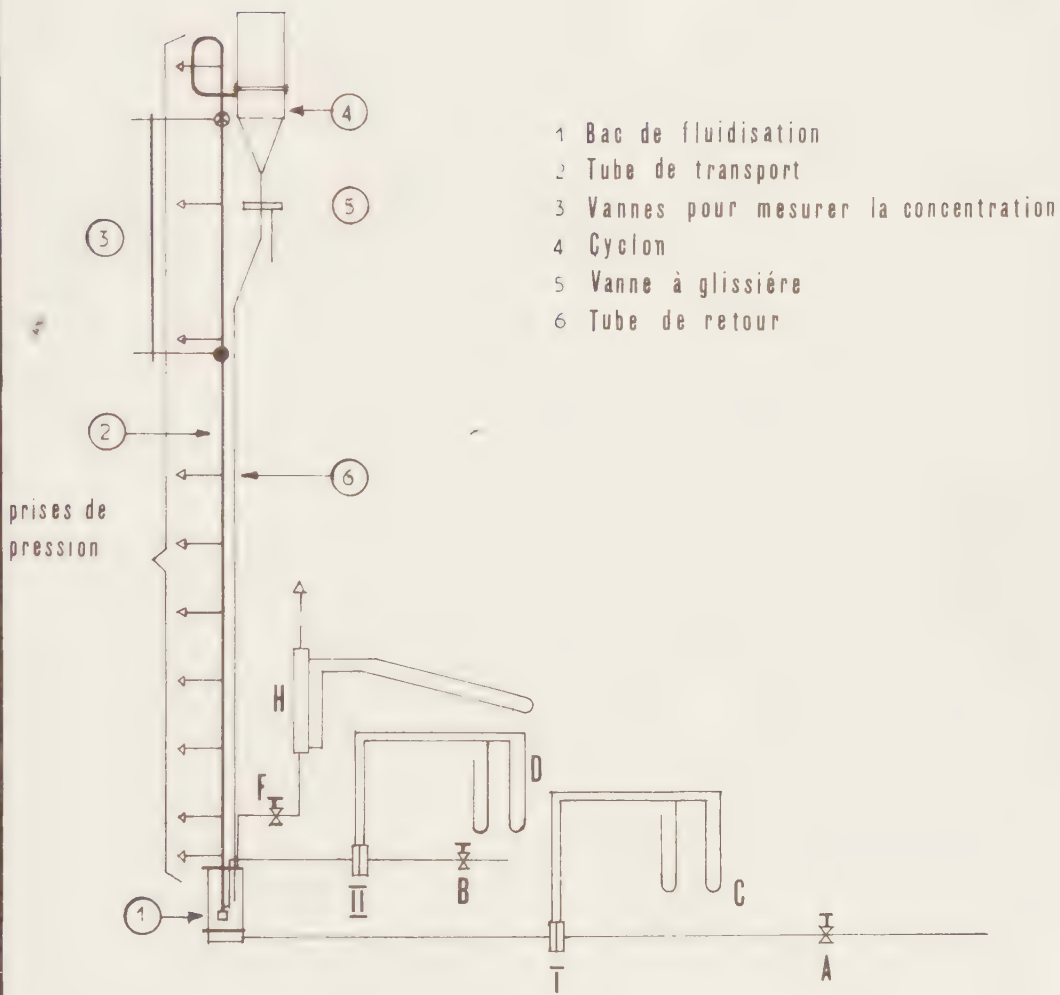


Figure 3

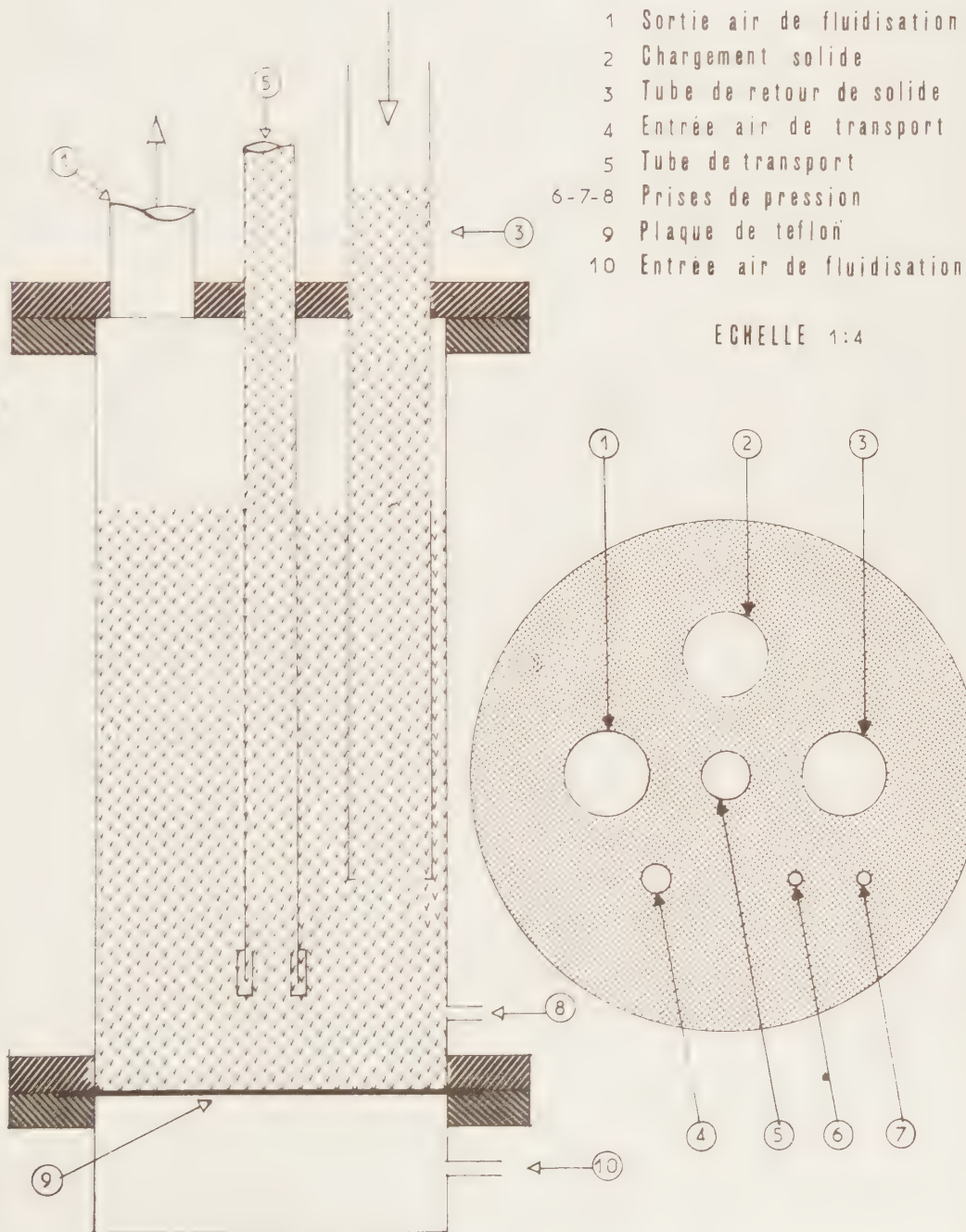
SCHEMA DE L'INSTALLATION



ECHELLE 1:50

Figure 4

BAC DE FLUIDISATION



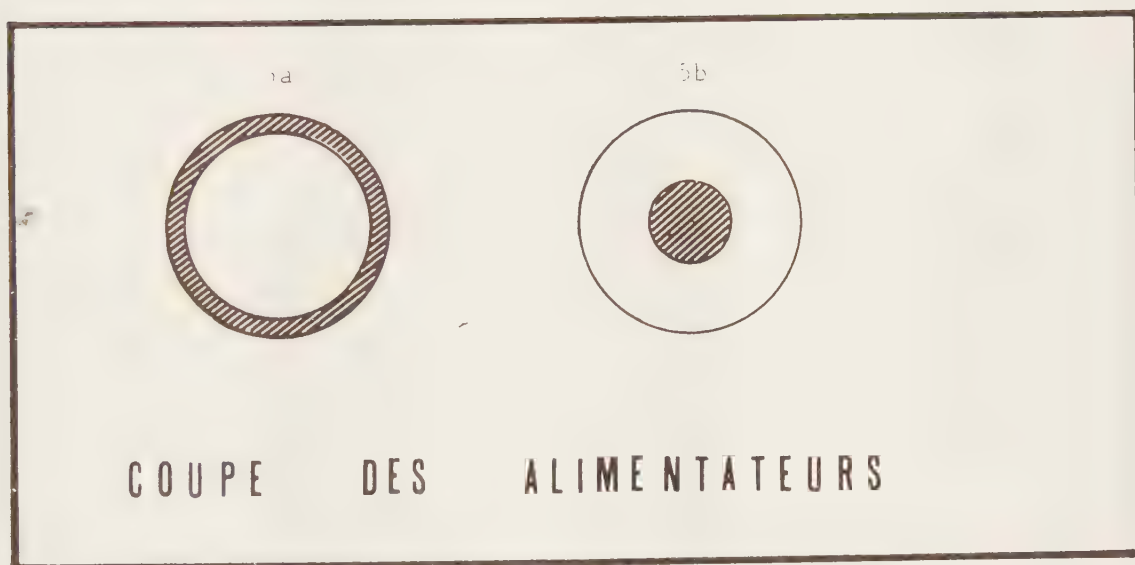
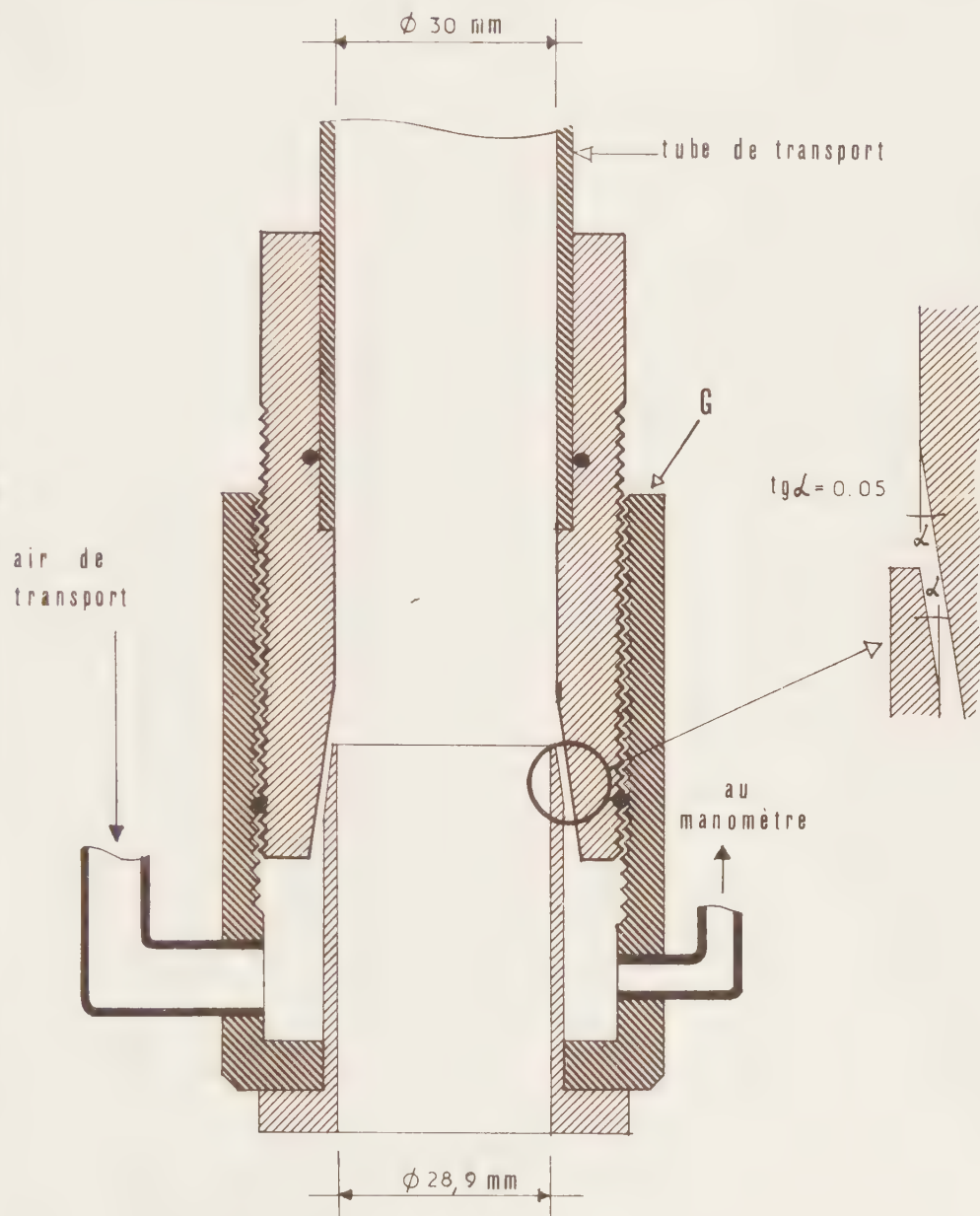


Figure 5

Figure 6

ALIMENTATEUR PERIPHERIQUE



ECHELLE 1:1

Figure 7

ALIMENTATEUR CENTRAL

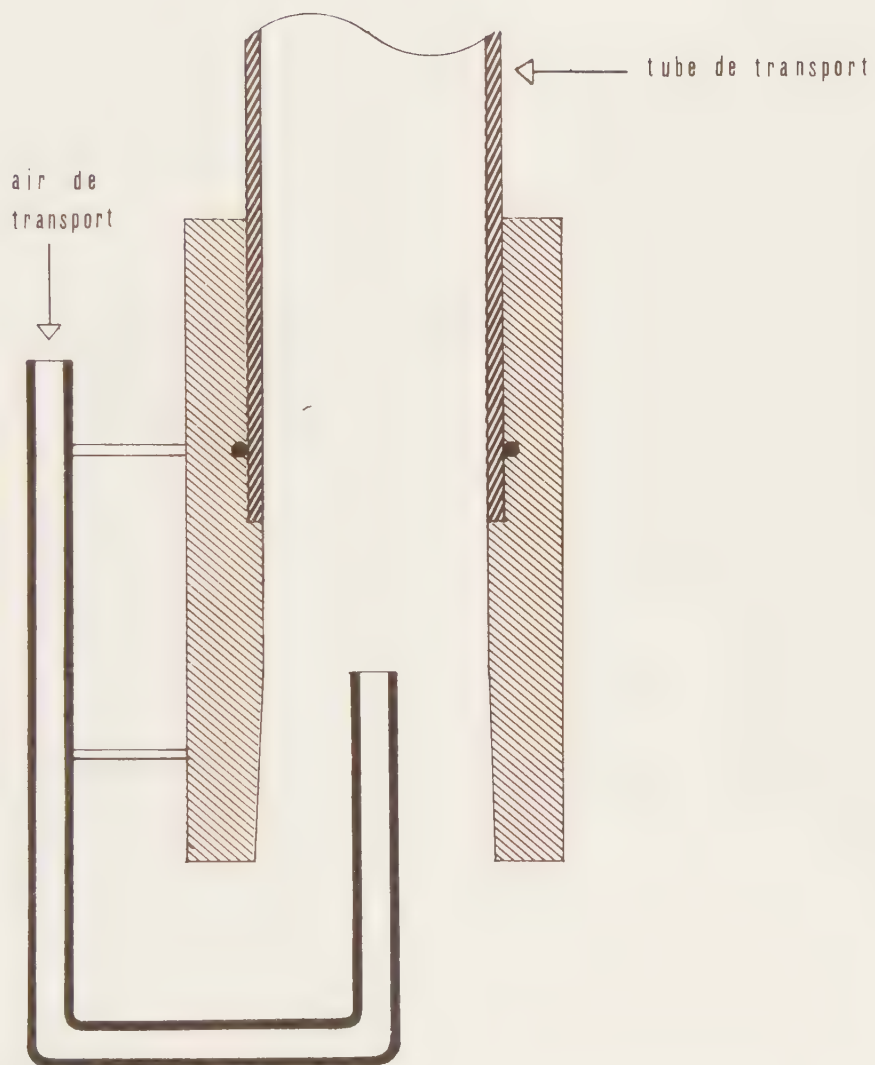


Figure 8

SCHEMA D'UNE PRISE DE PRESSION

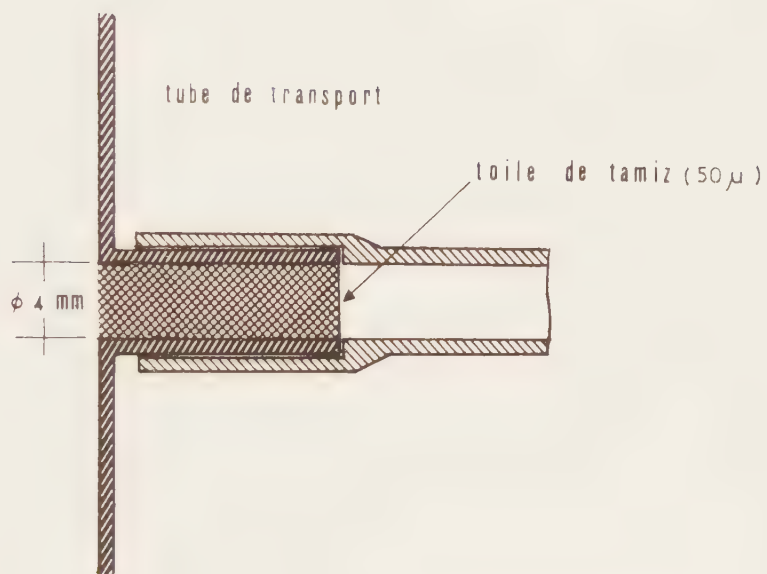


Figure 9

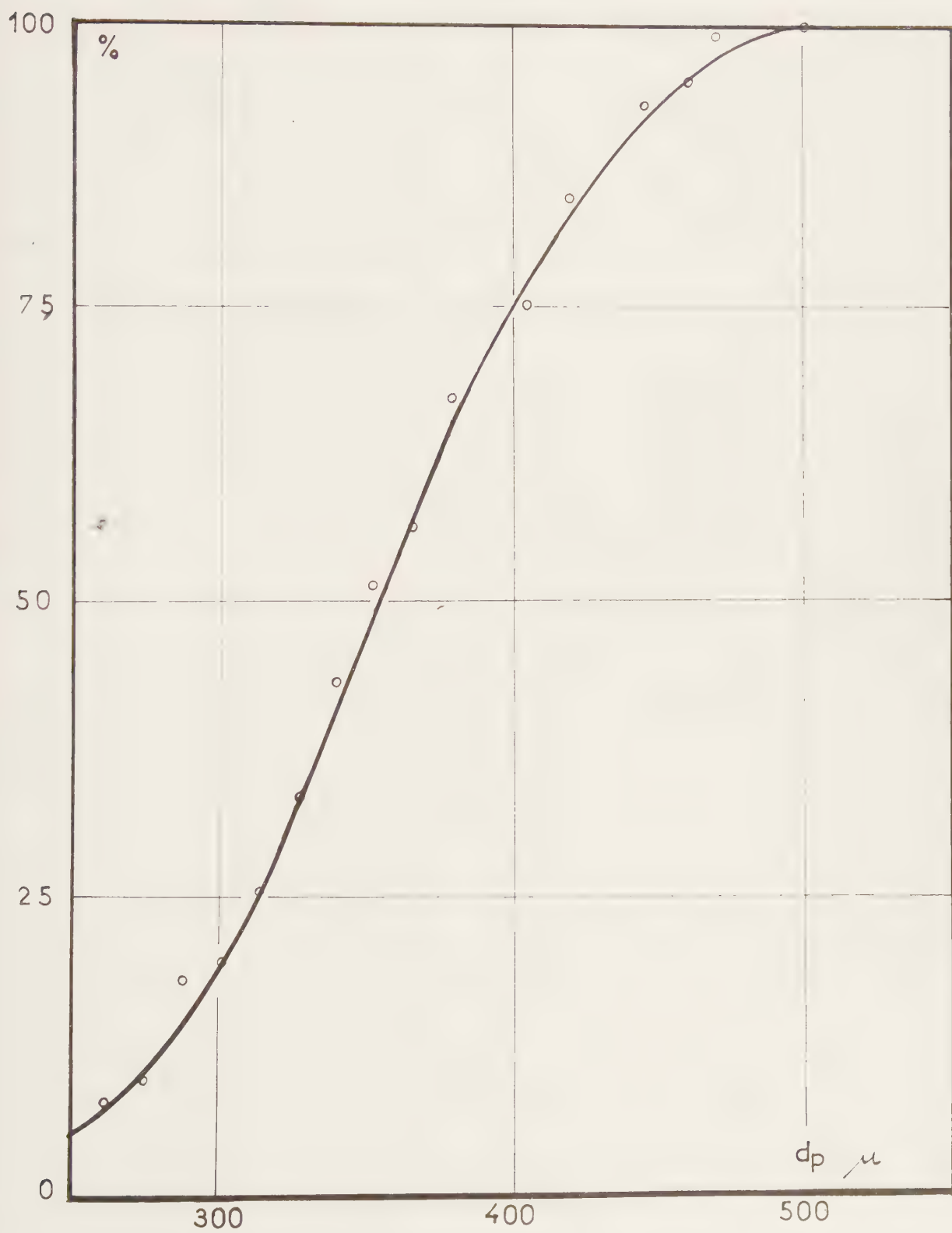


Figure 10

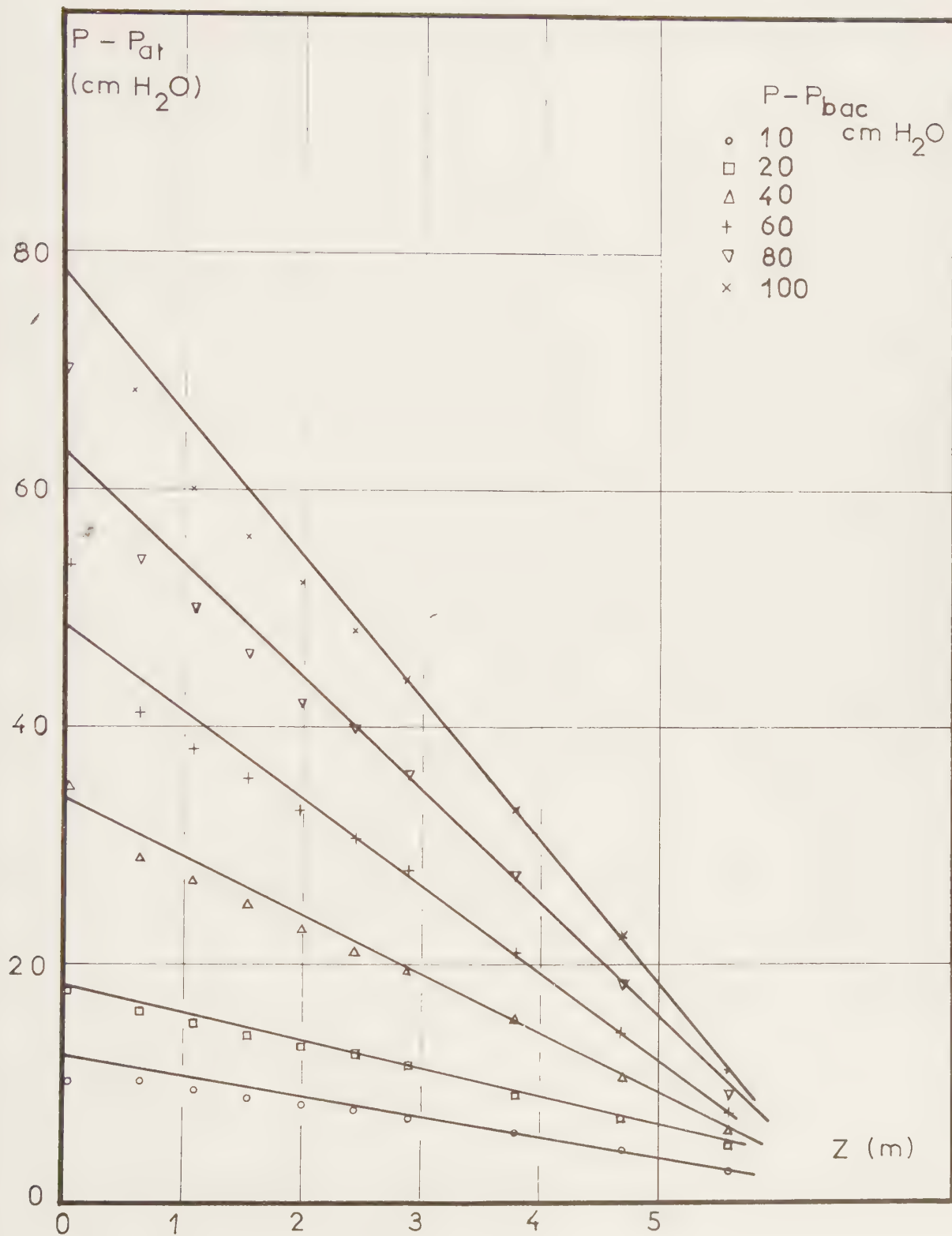


Figure 11



Figure 12

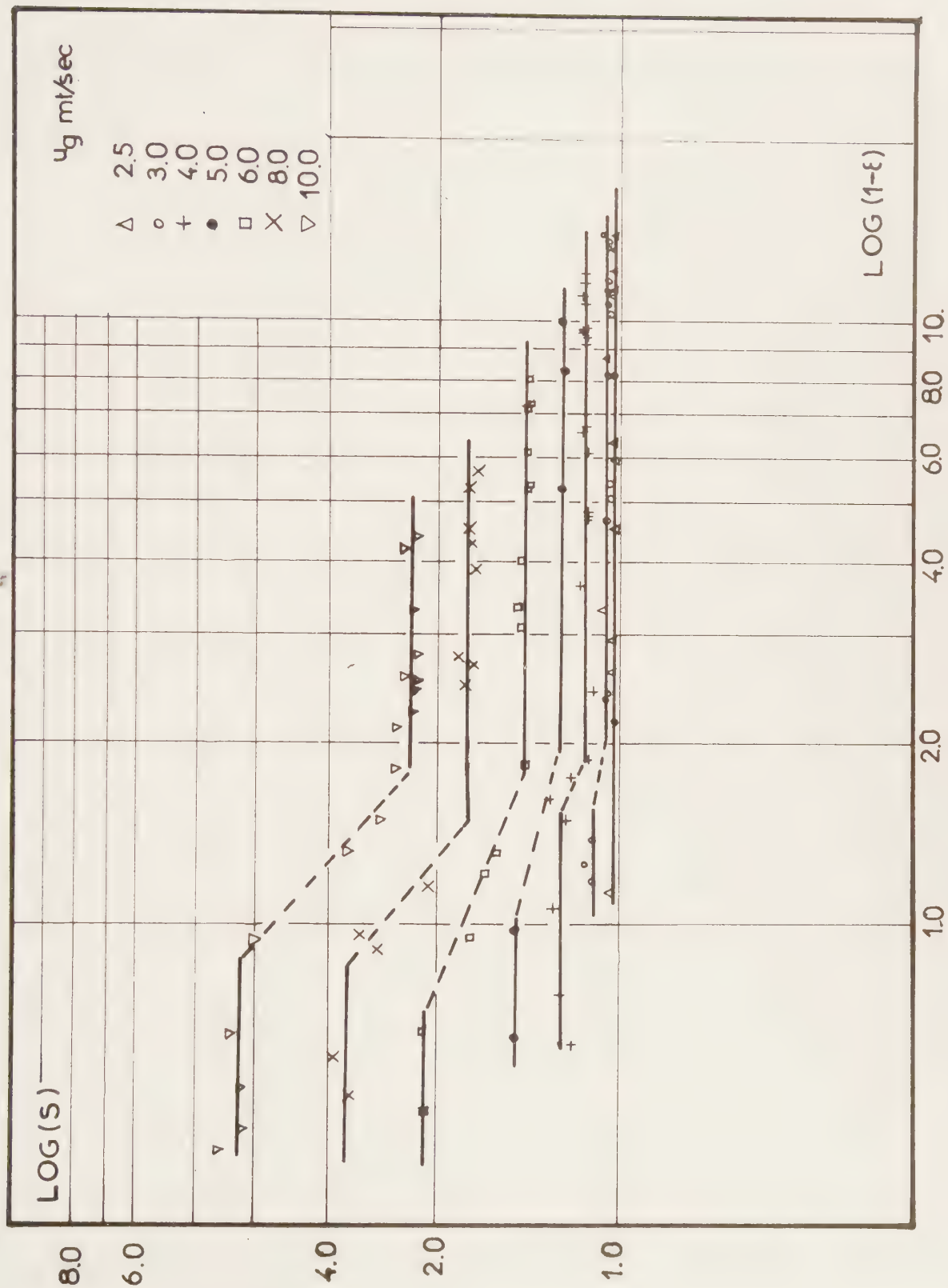


Figure 13

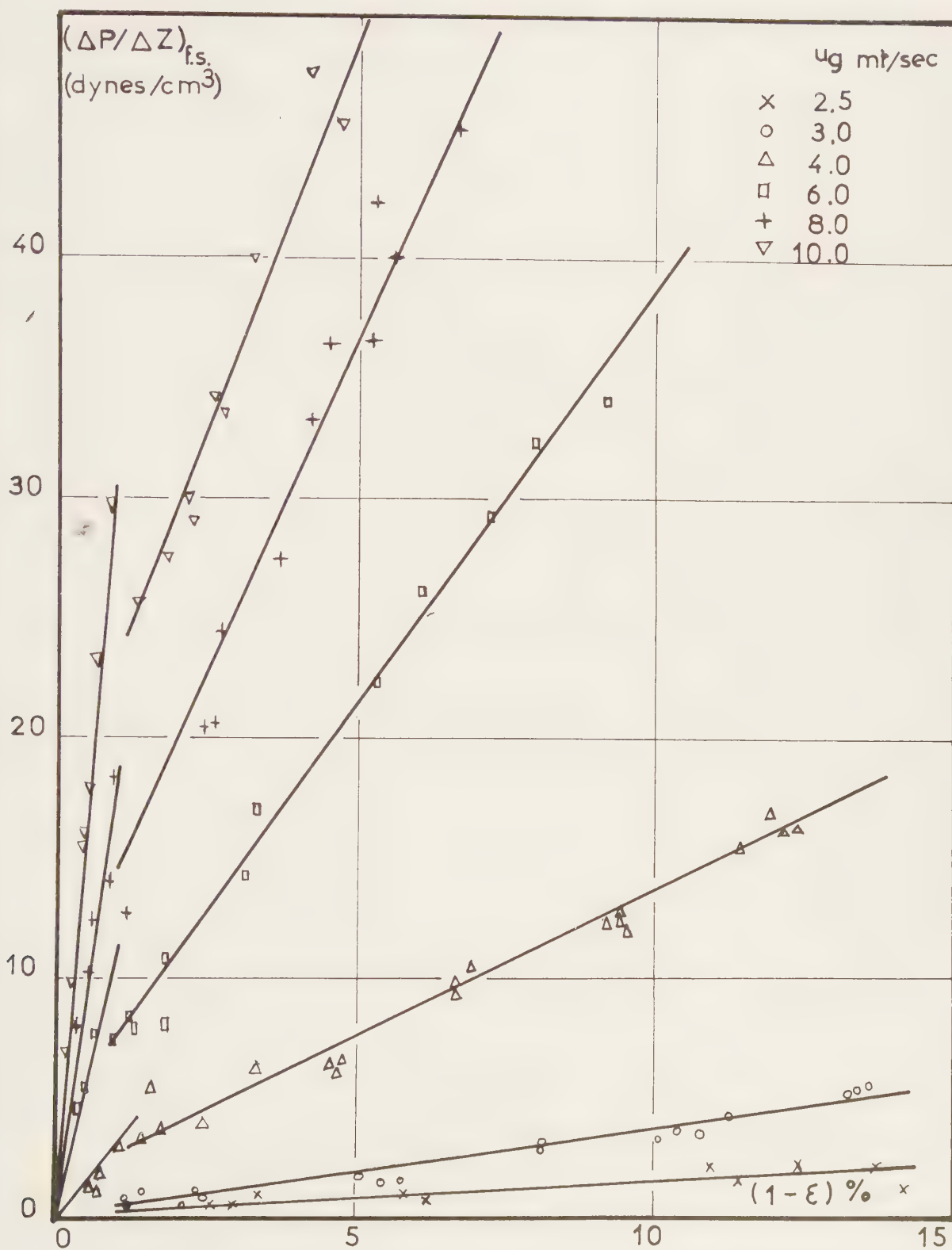


Figure 14

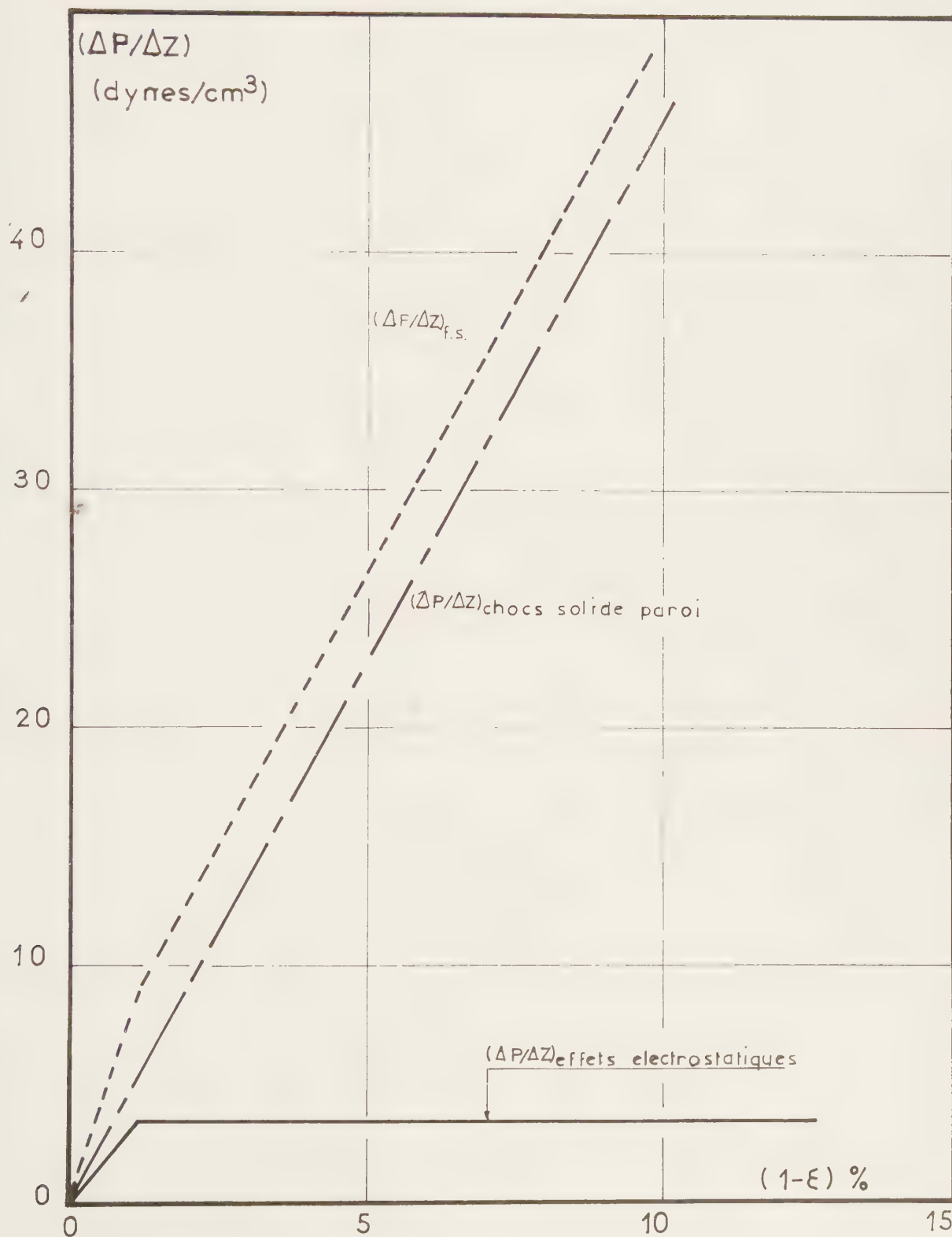


Figure 15

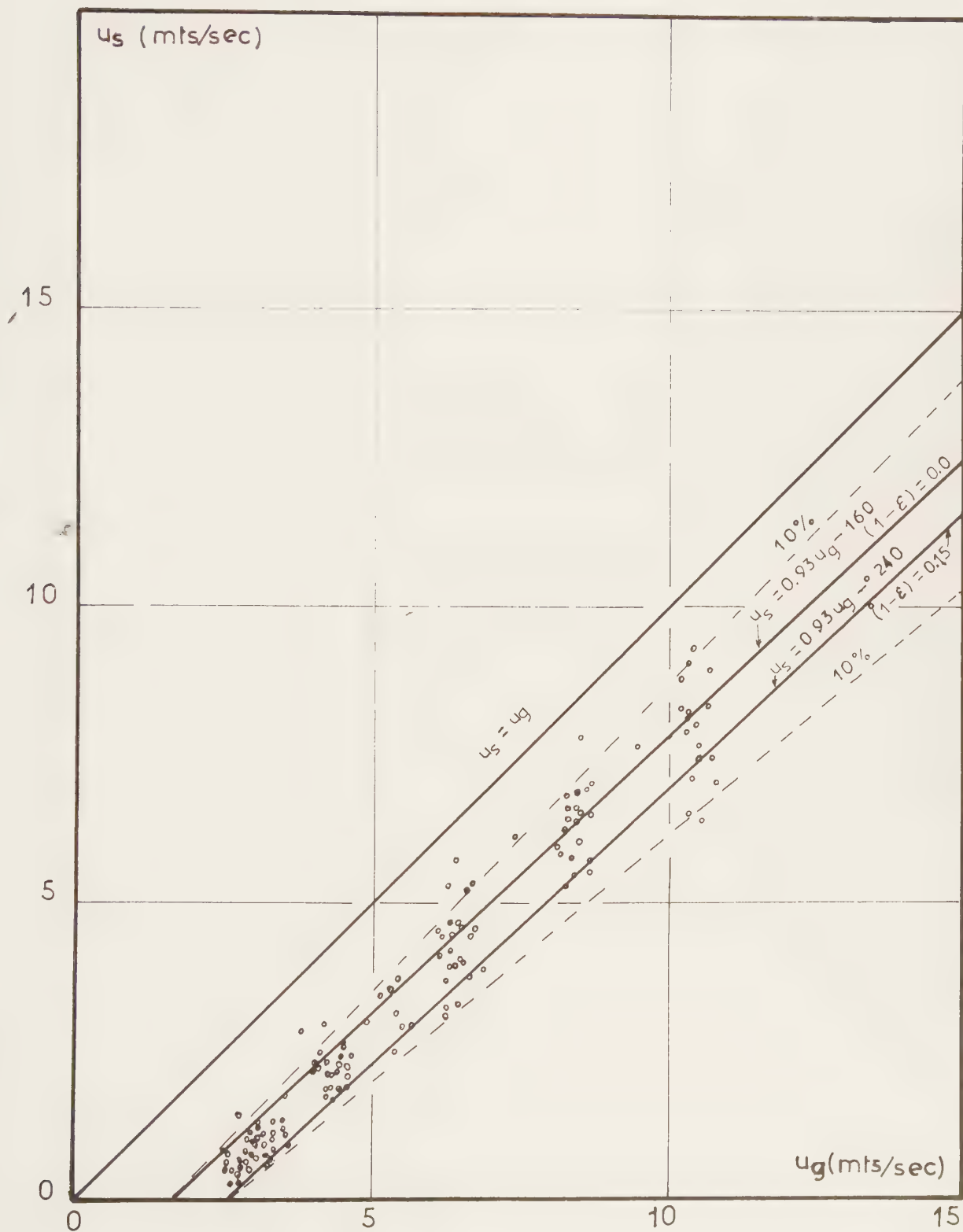


Figure 17

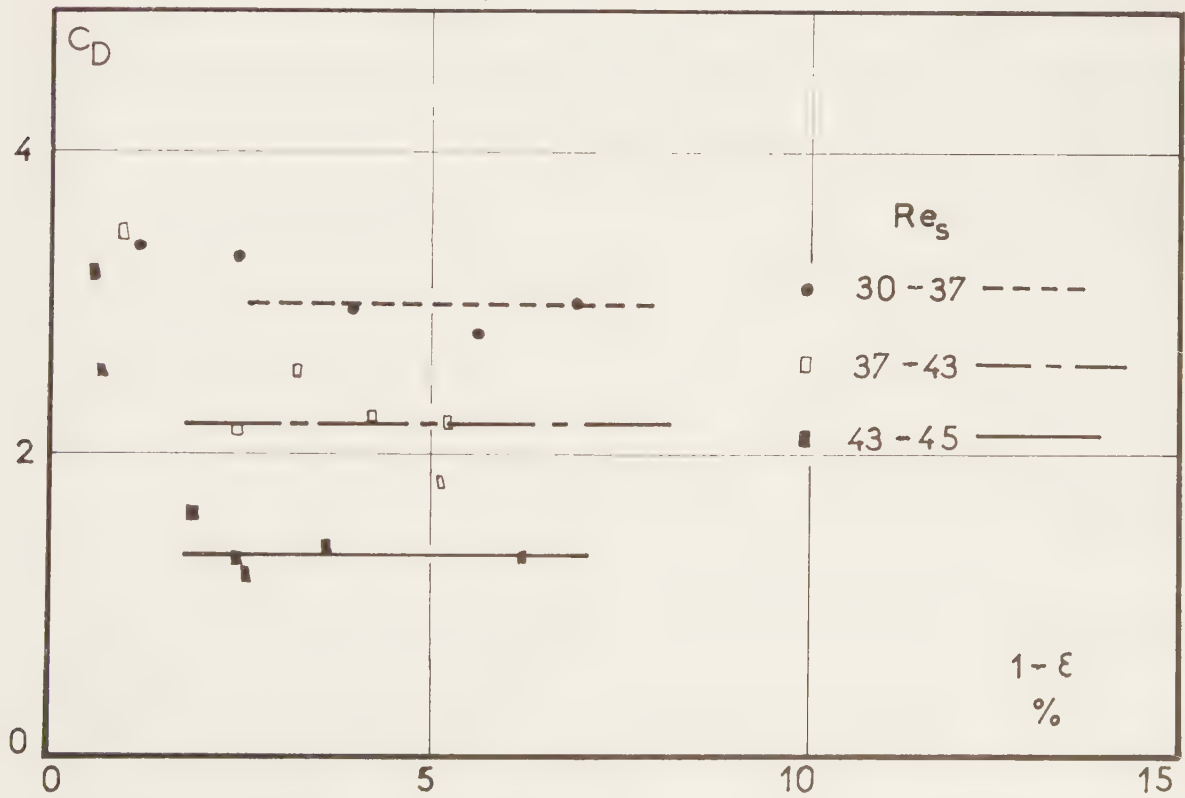
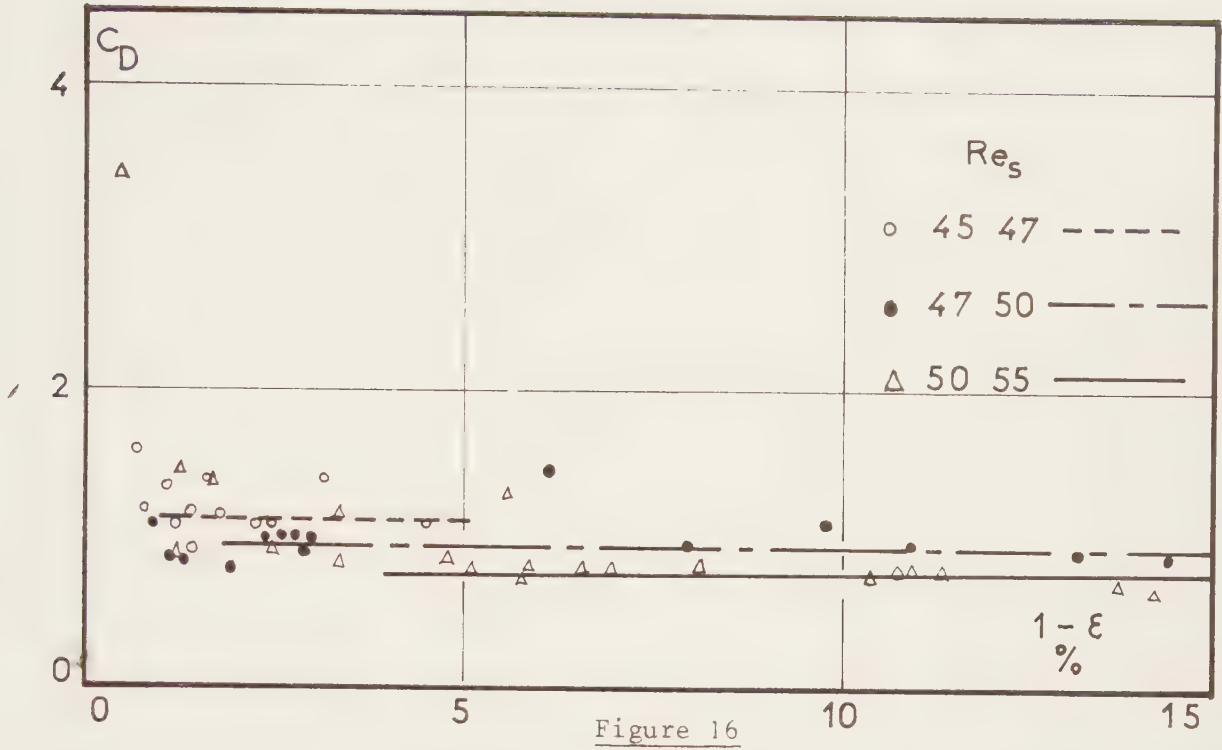


Figure 19

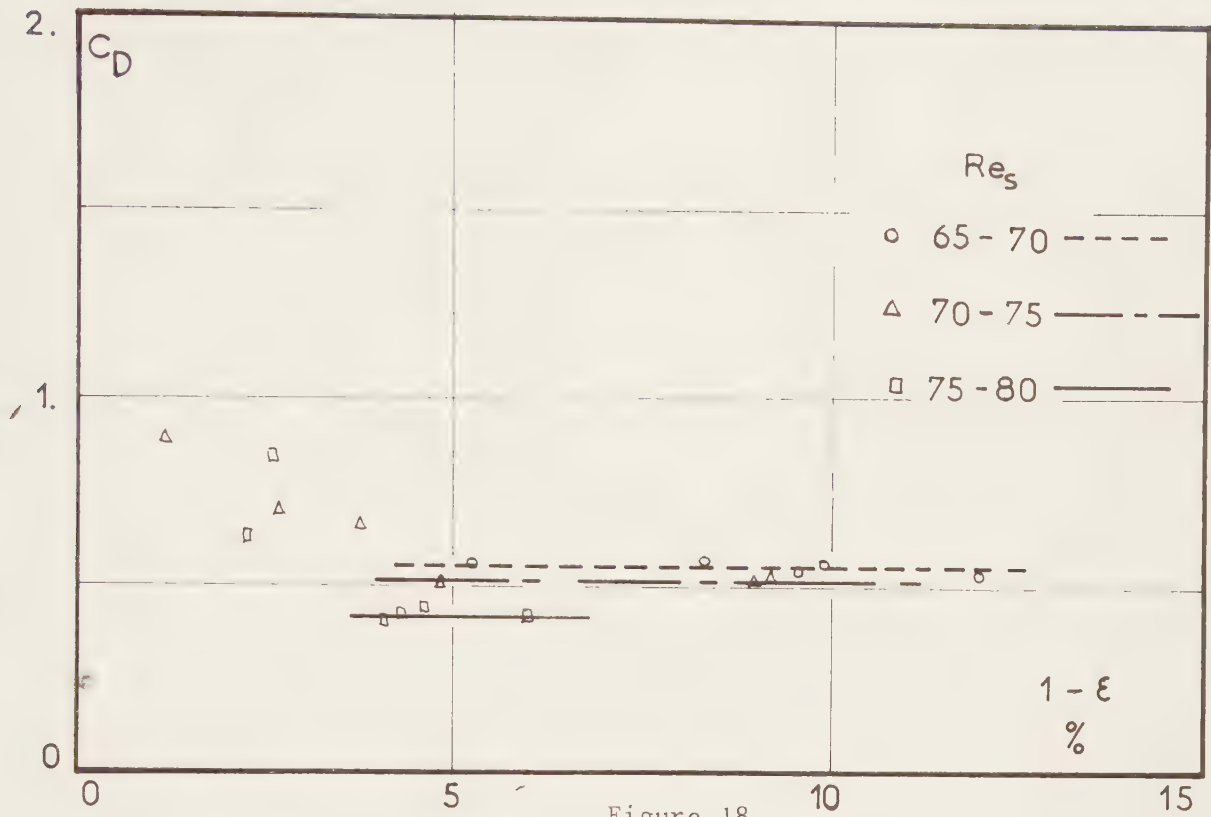


Figure 18

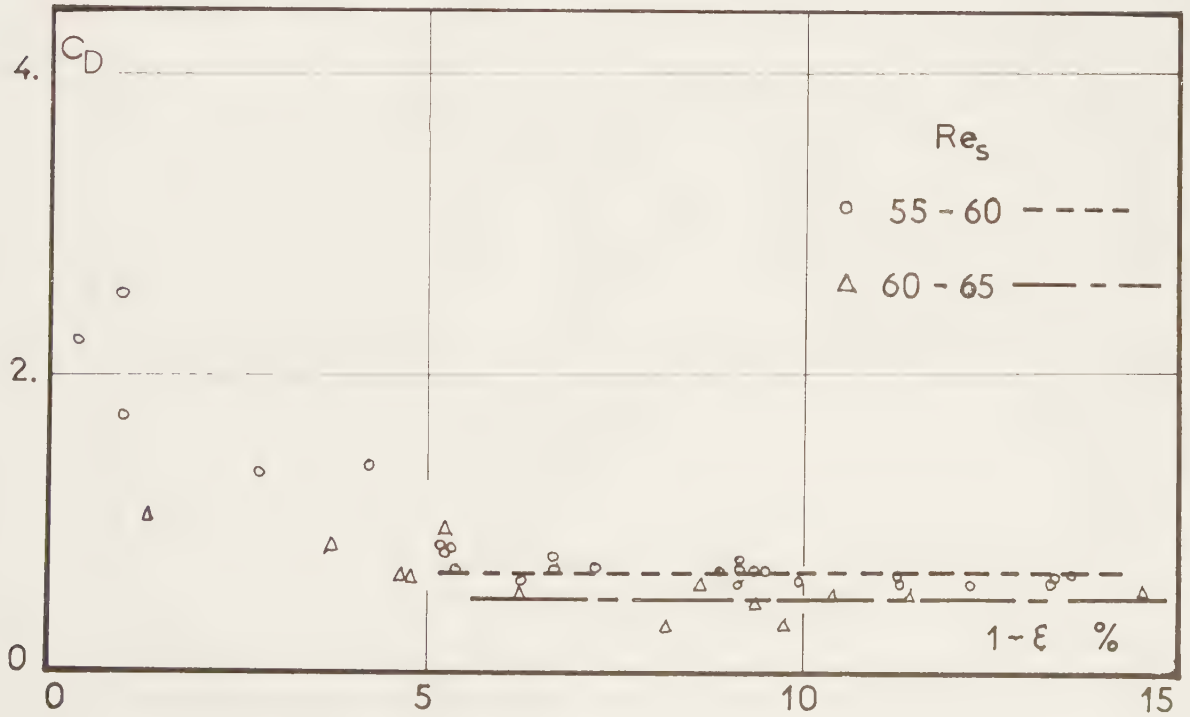


Figure 20

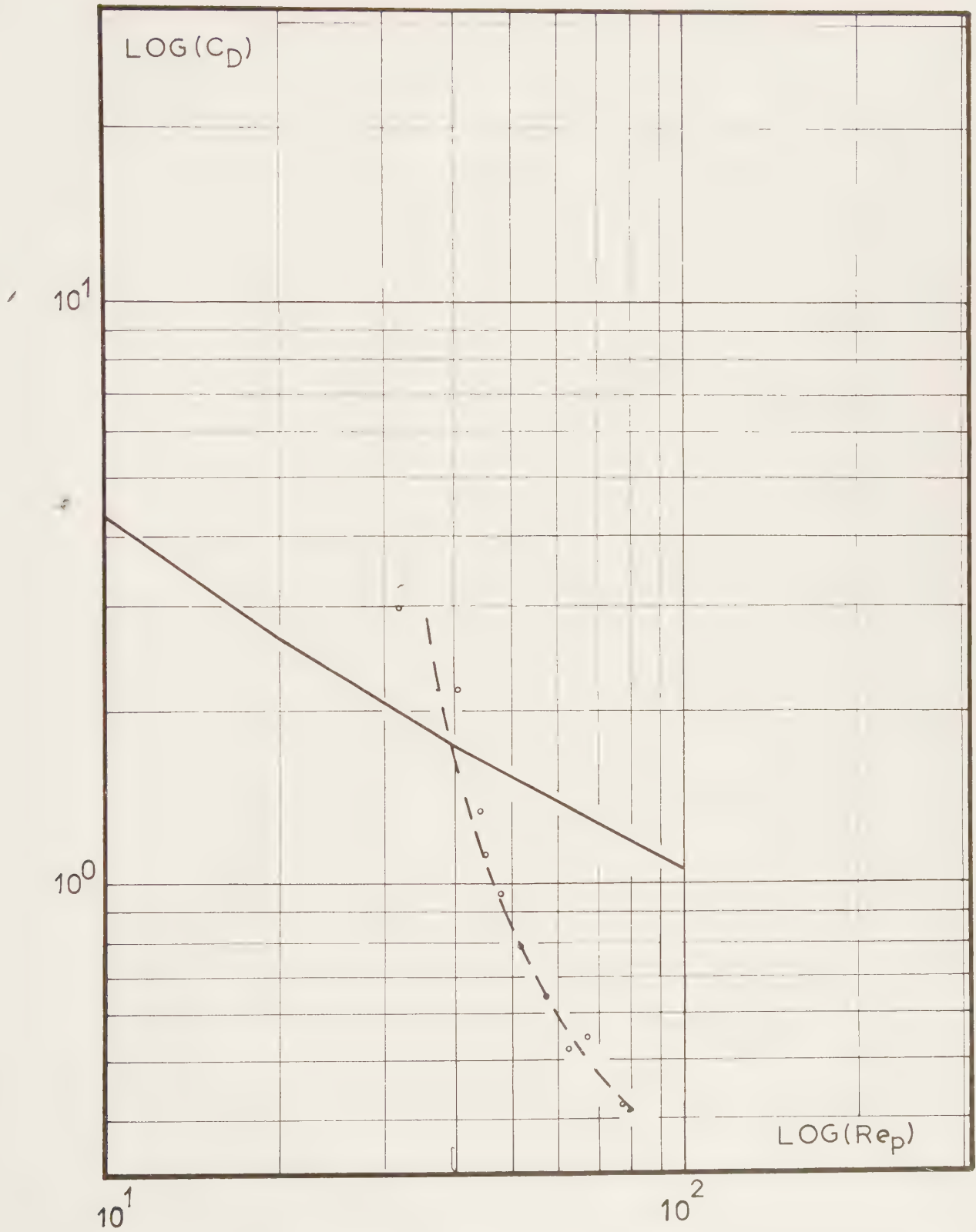


Figure 21

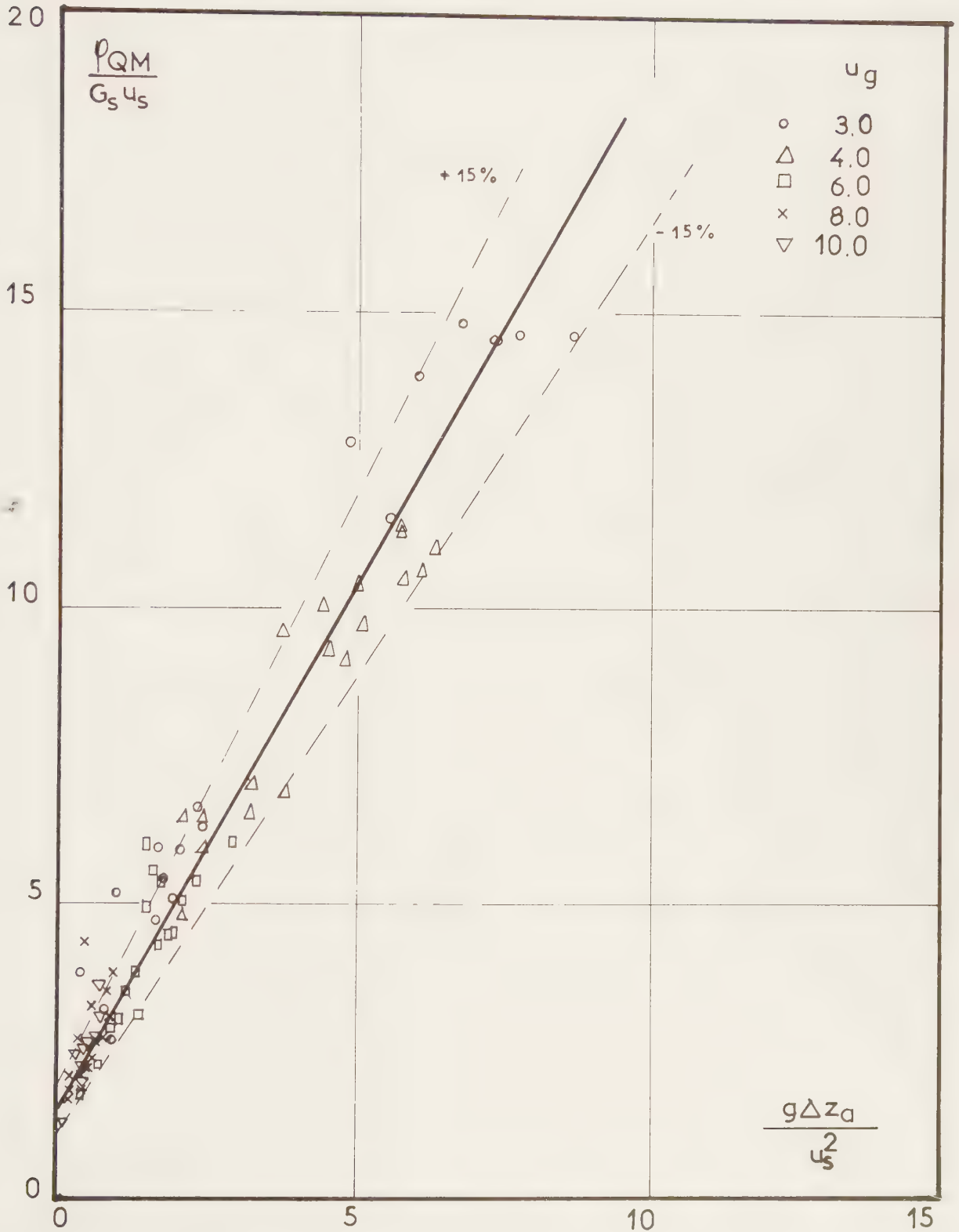


Figure 22







